

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Více parametrové hodnocení povrchů součástí

Multiparametric evaluation of workpieces surface

Student:

Bc. Pavel Turek

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Dagmar Klichová

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Turek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Více parametrové hodnocení povrchů součástí**
Multiparametric Evaluation of Workpieces Surface
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Termíny a definice podle normy pro 2D a 3D povrchy.
3. Měřicí metody a přístroje.
4. Experimentální část.
5. Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989, 340 s. ISBN 04-252-89.
[2] PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M., VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno: VUT v Brně, 2004. 151 s. ISBN 80-214-1997-0.
[3] MLČOCH, L.; SLIMÁK, I. *Řízení kvality a strojírenské metrologie*. Praha, SNTL, 1987.
[4] PETŘKOVSKÁ, L.; ČEPOVÁ, L. *Metrologie a řízení kvality*. Ostrava: VŠB-TUO, 2012. 142 s. ISBN 978-80-248-2771-1. Dostupné na <http://projekty.fs.vsb.cz/459/?ucebni-opory>.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Dagmar Klichová

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15.5.2017

Pavel Turek

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15.5.2017


.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Pavel Turek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Kopřivná 98, Hanušovice, 788 33

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

TUREK, P. Více parametrové hodnocení povrchů součástí : *diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 57 s. Vedoucí práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Diplomová práce je zaměřena na porovnání profilových a plošných parametrů povrchu materiálu, který byl vytvořen technologií soustružení a broušení. Tyto technologie jsou zde popsány. Dále jsou popsány a rozděleny profilové a plošné parametry povrchu. Na konci teoretické části jsou uvedeny metody měření topografie povrchu, které se rozdělují na kontaktní a bezkontaktní metodu. Experimentální část byla provedena na Ústavu geoniky AV ČR v. v. i v Ostravě, kde za pomoci optického profilometru MicroProf FRT byly změřeny vzorky.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

TUREK, P. Multiparametric evaluation of workpieces surface : *Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2017, 57 p. Thesis head: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Presented thesis is focused on comparing profile and surface parameters of the material which was created by turning and grinding technology. These technologies are defined and described in this document. The profile and surface parameters of the surface are described and divided. Next are said methods measurement of surface topography which divide into contact and uncontact methods. Experimental part was created at the Institute of Geonics CZ v. v. in Ostrava where we measured parts with the optical measuring system MicroProf FRT.

Obsah

Seznam použitého značení, symbolů a zkratek.....	7
1. Úvod.....	10
1.1 KONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - SOUSTRUŽENÍ.....	11
1.2 KONVENČNÍ TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ - BROUŠENÍ	16
2 Termíny a definice pro profilové a plošné parametry	19
2.1 PROFILOVÉ PARAMETRY POVRCHU.....	19
2.1.1 Definice základních pojmů	19
2.1.2 Názvy geometrických parametrů	22
2.1.3 Výškové parametry (výstupky a prohlubně)	22
2.1.4 Výškové parametry (průměrné hodnoty souřadnic)	23
2.1.5 Délkové parametry	25
2.1.6 Tvarové parametry	26
2.1.7 Křivky a odpovídající parametry.....	26
2.2 PLOŠNÉ PARAMETRY POVRCHU	27
2.2.1 Filtrace povrchu.....	27
2.2.2 Termíny geometrického parametru a prvku	29
2.2.3 Výškové parametry	30
2.2.4 Prostorové parametry	31
2.2.5 Hybridní parametry.....	31
2.2.6 Funkční a související parametry	31
2.2.7 Smíšené parametry	33
2.2.8 Parametry pojmenovaného prvku	33
3 Metody měření topografie povrchu	34
3.1 KONTAKTNÍ METODY MĚŘENÍ.....	34
3.2 BEZKONTAKTNÍ METODY MĚŘENÍ.....	35
4 Experimentální část.....	37
4.1 POPIS VZORKŮ.....	37
4.2 MĚŘENÍ VZORKŮ POMOCÍ OPTICKÉHO PROFILOMETRU MICROPROF FRT.....	38
4.3 ANALÝZA ZKOUMANÝCH POVRCHŮ POMOCÍ PROFILOVÝCH PARAMETRŮ	39
4.4 ANALÝZA ZKOUMANÝCH POVRCHŮ POMOCÍ PLOŠNÝCH PARAMETRŮ	48
5 Zhodnocení a závěr	52
6 Literatura.....	54
Seznam použitých obrázků.....	57
Seznam použitých tabulek.....	58

Seznam použitého značení, symbolů a zkratek

Značení	Význam	Jednotky
α	Úhel hřbetu	[°]
β	Úhel břitu	[°]
γ	Úhel čela	[°]
δ	Úhel řezu	[°]
θ	Rovinný úhel	[°]
λ_s	Úhel sklonu břitu	[°]
λ_c	Filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti	[mm]
λ_f	Filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu	[mm]
λ_s	Filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu	[μm]
χ_r	Úhel nastavení hlavního ostří	[°]
χ_r'	Úhel nastavení vedlejšího ostří	[°]
σ	Směrodatná odchylka	[μm]
a	Specifikovaná výška	[-]
a_p	Hloubka obráběné vrstvy	[mm]
b	Referenční rovina	[-]
d	Průměr obrobené plochy	[mm]
D	Průměr obráběné plochy	[mm]
f	Posuv na otáčku	[mm]
f_{SRC}	Hladká – drsná stupnice přejetí	[-]
h	Přísuv	[mm·min ⁻¹]
H	Šířka brousícího kotouče	[mm]
l	Délka obrobené plochy	[mm]
L	Délka obráběné plochy	[mm]
ln	Vyhodnocovaná délka	[mm]
l_p	Základní délka	[mm]
LPL	Nižší mez plošiny	[μm]
lr	Základní délka	[mm]
LVL	Nižší mez údolí	[μm]
l_w	Základní délka	[mm]
max	Maximální hodnota	[μm]
min	Minimální hodnota	[μm]
n	Počet otáček vřetene	[min ⁻¹]
n	Počet měření	[-]
P	Parametr profilu	[-]
P_a, Ra, W_a	Průměrná aritmetická odchylka profilu	[μm]
P_c, Rc, W_c	Průměrná výška prvků profilu	[μm]

Značení	Význam	Jednotky
$P\hat{d}c, R\hat{d}c, W\hat{d}c$	Rozdíl výšky úseku profilu	[μm]
$P\Delta q, R\Delta q, W\Delta q$	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu	[μm]
Pku, Rku, Wku	Špičatost posuzovaného profilu	[μm]
$Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c)$	Materiálový poměr profilu	[μm]
Pp, Rp, Wp	Největší výška výstupku profilu	[μm]
Pq, Rq, Wq	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
Psk, Rsk, Wsk	Šikmost posuzovaného profilu	[μm]
PSm, RSm, WSm	Průměrná šířka prvků	[μm]
Pt, Rt, Wt	Výška profilu	[μm]
P_v, R_v, W_v	Největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
Pz, Rz, Wz	Největší výška profilu	[μm]
R	Parametr drsnosti	[-]
Rmq	Relativní poměr materiálu v průsečíku plošiny a údolí	[-]
Rpq	Skon lineární regrese provedený přes oblast plošiny	[$^\circ$]
RSm	Průměrná šířka jednotlivých prvků profilu	[mm]
Rvq	Skon lineární regrese provedený přes oblast údolí	[$^\circ$]
Sq	Základ průměrné výšky omezené stupnice povrchu	[μm]
Sa	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu	[μm]
$Safc$	Složitost fraktální plochy	[-]
Sal	Délková autokorelace	[μm]
Sdr	Poměr rozvinuté mezifázové plochy povrchu	[μm]
Sdq	Základ průměrného čtverce gradientu povrchu	[μm]
S_k	Výška jádra	[μm]
Sku	Špičatost omezené stupnice povrchu	[μm]
$Smc(mr)$	Opačný poměr plochy materiálu omezeného povrchu	[%]
Sp	Maximální výška piku (vrcholu) omezené stupnice	[μm]
Spc	Aritmetický průměr zakřivení piku	[μm]
Spd	Hustota piku	[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
$SPIP$	Obrazový procesor snímací sondy	[-]
$Smr1, Smr2$	Poměr materiálu	[%]
$Smr(c)$	Poměr plochy materiálu omezené stupnicí povrchu	[μm]
Smq	Poměr materiálu	[%]
$SPIP$	Obrazový procesor snímací sondy	[-]
Spk	Redukovaná výška piku	[μm]
Spq	Základ průměrné úchylky čtverců plošiny	[μm]
$Srel(c)$	Funkce relativní plochy	[μm]
Ssk	Šikmost omezené stupnice povrchu	[μm]
Std	Směr textury omezené stupnice povrchu	[-]
Str	Poměr aspektu textury	[μm]
Sv	Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu	[μm]

Značení	Význam	Jednotky
S_{vfc}	Složitost fraktálního objemu	$[\text{mm}^3]$
S_{vk}	Redukovaná hloubka údolí	$[\mu\text{m}]$
$S_{vs(c)}$	Funkce stupnice objemu	$[\text{mm}^3]$
S_{vq}	Základ průměrné úchylky čtverců údolí	$[\mu\text{m}]$
S_z	Maximální výška omezené stupnice povrchu	$[\mu\text{m}]$
S_{xp}	Extrémní výška piku	$[\mu\text{m}]$
$S5V$	Pět bodů hloubky prohlubně	$[-]$
$S10z$	Deset bodů výšky povrchu	$[-]$
Th	Práh	$[-]$
UPL	Vyšší mez plošiny	$[\mu\text{m}]$
UVL	Vyšší mez údolí	$[\mu\text{m}]$
v_c	Řezná rychlost	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_e	Výsledná řezná rychlost	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_f	Posuvová rychlost	$[\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}]$
V_{mc}	Jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu	$[\text{mm}^3]$
V_{mp}	Pik objemu materiálu omezené stupnicí povrchu	$[\text{mm}^3]$
$V_{m(p)}$	Objem materiálu	$[\text{mm}^3]$
v_{ob}	Obvodová rychlost obrobku	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_s	Podélný posuv	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
V_{vc}	Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu	$[\text{mm}^3]$
$V_{v(p)}$	Neplatný objem	$[\text{mm}^3]$
V_{vv}	Neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu	$[\text{mm}^3]$
W	Parametr vlnitosti	$[-]$
X	Poměr plochy materiálu	$[\%]$
\bar{x}	Výběrový průměr	$[\mu\text{m}]$
x_i	Naměřené hodnoty parametrů drsnosti	$[\mu\text{m}]$
X_s	Šířka prvku profilu	$[\text{mm}]$
Y	Výška	$[\text{mm}]$
Z_p	Výška výstupku profilu	$[\mu\text{m}]$
Z_t	Výška prvku profilu	$[\mu\text{m}]$
Z_v	Hloubka prohlubně profilu	$[\mu\text{m}]$
$Z(x)$	Hodnota pořadnic	$[\mu\text{m}]$

1. Úvod

Hlavním úkolem metrologie povrchu je, abychom získali přesného popisu, který zahrnuje geometrické a fyzikální vlastnosti povrchu a jejich vztahu k účelným požadavkům, příp. k posouzení změn stavu povrchu v průběhu jeho účelného zatěžování.

Komplexní vývoj metrologie povrchu zařazuje přípravu měřicí techniky i metod a prostředků hodnocení textury povrchu. Vzhledem k tomu, že měřicí systémy a zařízení jsou poměrně na vysoké technické dokonalosti, co se týče přesnosti snímání a záznamu profilu, příp. plochy povrchu, se pozornost zahrnuje na zodpovězení otázky, jak naměřená data povrchu vyhodnotit a v praxi využít.

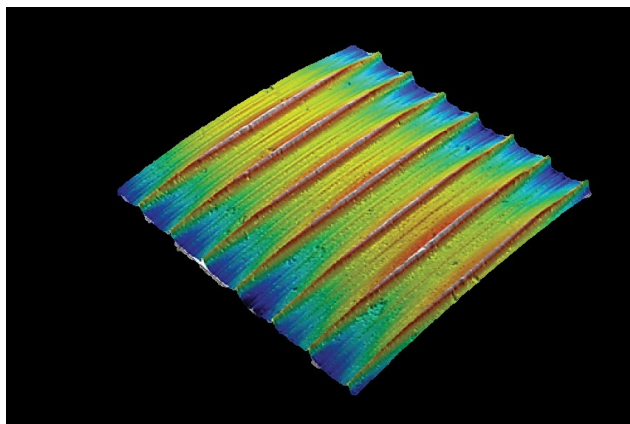
Měření a klasifikace textury povrchu představuje samostatný obor metrologie. Zvláštní metodiky i měřicí prostředky, díky nimž dosáhneme potřebných údajů pro charakteristiku kvality kontrolovaného povrchu. Kvantifikovanou formu popisu vlastností zahrnují parametry profilu povrchu.

Prostorové hodnocení (3D) textury povrchu přináší nejen podrobnější informace o vlastním profilu nerovností, ale i užitečné údaje o jeho funkčních vlastnostech, příp. životnosti.

Diplomová práce se věnuje víceparametrovému hodnocení povrchů součástí, kdy na vybraných vzorcích je provedena analýza pomocí vybraných profilových a plošných parametrů. Povrchy zkoumaných vzorků byly nasnímané pomocí optického profilometru MicroProf FRT.

1.1 Konvenční technologie obrábění - soustružení

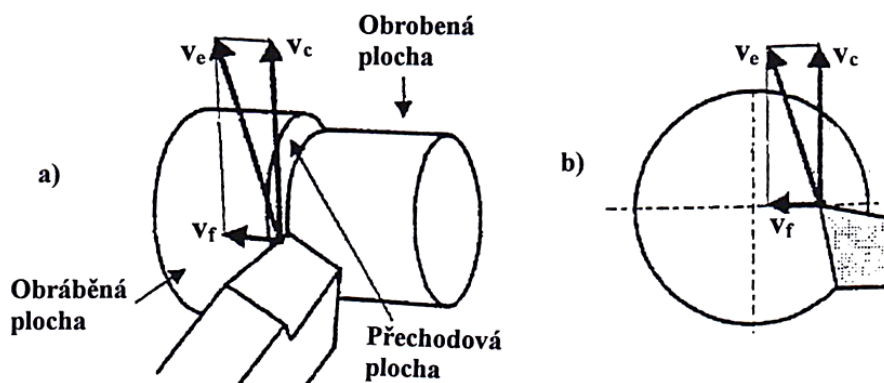
Jedná se o klasickou metodu třískového obrábění, která se používá převážně pro výrobu rotačních součástí za pomoci jednobřitých nástrojů, které mohou být různě provedeny, říkáme jim tzv. soustružnické nože. Při soustružení dochází k odřezávání přídavku na obrábění pomocí řezné části nástroje, který má definovanou geometrii. Vrstva, která se odřezává, odchází od obrobku ve formě třísky. Činná část nástroje musí mít klínový břit, aby došlo k oddělení třísky od polotovaru. Ten je podstatně tvrdší než obráběný materiál. Používají se ručně ovládané, poloautomatické, automatické nebo programované řízené soustruhy. [1]



Obrázek 1 Povrch po soustružení [2]

1.1.1 Pohyby při soustružení

- Hlavní řezný pohyb (v_c) – jde o pohyb rotační, který vykonává obrobek. Při rotaci obrobku dochází k odebírání třísky prostřednictvím soustružnického nože (viz obr. 2). [1]
- Posuvový pohyb (v_f) – jedná se o pohyb vedlejší, který je obvykle přímočarý a vykonává nástroj. Tento pohyb slouží k tomu, aby nůž odebíral třísku požadovaného průřezu (viz obr. 2). [1]
- Výsledný řezný pohyb (v_e) – pokud se u soustružení nůž posouvá ve směru osy rotace obrobku, jeho výsledný řezný pohyb má tvar šroubovice, pokud se posouvá v kolmém směru k ose rotace, pak má jeho výsledný řezný pohyb tvar Archimedovy spirály (viz obr. 2) [1]



Obrázek 2 Druhy soustružení a) podélné, b) čelní [1]

1.1.2 Výběr úhlů geometrie řezné části nástroje

Úhel hřbetu α

Tento úhel značně ovlivňuje velikost tření, které vzniká pohybem hřbetu nástroje po řezné ploše. Pokud se nám tento úhel zmenšuje, zvětšuje se styková plocha řezu s plochou hřbetu a dochází ke zvětšování tření mezi nimi. [3]

Velikost tohoto úhlu se pohybuje v rozmezí od 8 do 12°. [4]

Úhel břitu β

Jedná se o úhel klínové části nástroje. Pokud je úhel tohoto klínu větší, pak tímto vzniká větší odpor při oddělování třísky. Podle tohoto hlediska by se měl úhel volit co nejmenší. [3]

Úhel čela γ a úhel řezu δ

Tyto úhly mají největší vliv na průběh řezání. Určují polohu čela nástroje vzhledem k pracovní rovině řezu. Úhel čela může mít kladnou i zápornou hodnotu. Pokud je úhel δ menší než 90°, pak je úhel γ kladný, naopak pokud je větší, tak je úhel γ záporný. Pokud se nám zvětšuje úhel δ , pak se úhel čela γ zmenšuje. V důsledku toho se zvětšuje intenzita plastických deformací ve vrstvě, kterou odřezáváme z materiálu, a tím i tření třísky odváděné po čele nástroje. Dále se zvětší intenzita otupování břitu a řezný odpor materiálu. [3]

Velikost úhlu γ se pohybuje v rozmezí od -8 do 8°. [4]

Úhel nastavení hlavního ostří χ_r

Úhel nám určuje polohu ostří vzhledem k obrobku. Určuje také průřez třísky. Tento úhel by měl být vždy co nejmenší, ale nesmí docházet k velkému tření mezi nástrojem a obrobenou plochou. Změna tvaru průřezu třísky má vliv na trvanlivost břitu, na velikost řezného odporu a na teplotu řezání. Pokud se zmenšuje úhel χ , tak se zvětšuje délka styku ostří s obráběným kovem. [3]

Velikost úhlu se pohybuje v rozmezí od 45 do 90°. [4]

Úhel nastavení vedlejšího ostří χ_r'

Ovlivňuje kvalitu obrobené plochy a tření mezi nástrojem a obrobenou plochou. Pokud je úhel menší, tak se zmenšuje i drsnost obrobené plochy, protože jsou stopy po obrábění menší než při větším úhlu. [3]

Velikost úhlu se pohybuje v rozmezí od 45 do 90°. [4]

Úhel sklonu břitu λ_s

Tento úhel má mnohoznačný funkční význam, má vliv na odchod třísky po čele, tuhost břitu, trvanlivost břitu či jakost povrchu. Lepší jakosti povrchu dosáhneme u nástrojů, jehož úhel λ je kladný, záporný úhel λ působí na povrch negativně, protože je složitější odchod třísky. [3]

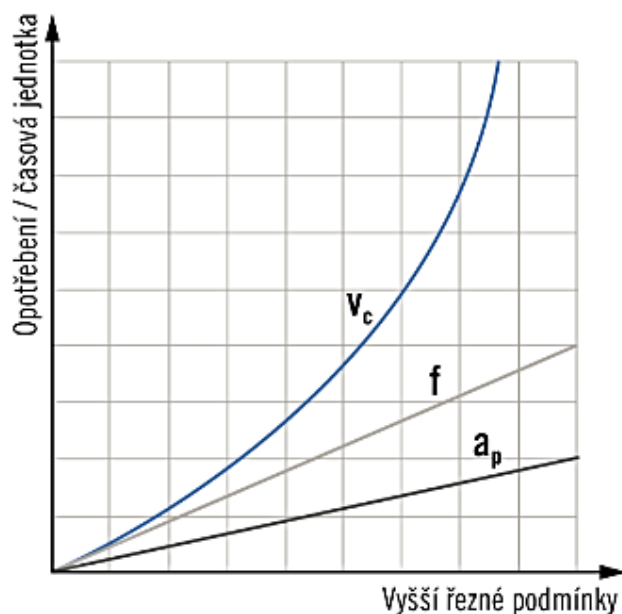
1.1.3 Řezné podmínky

Pokud chceme stanovit řezné podmínky, pak jde zejména o volbu řezné rychlosti v_c , posuvu f a tloušťky obráběné vrstvy a_p .

Řezná rychlost (v_c) – Je to hlavní rychlost řezného pohybu a je definovaná jako obvodová rychlost, která je měřená na obráběné ploše. Vzhledem k druhu materiálu a obrobků se používají různé řezné rychlosti v rozsahu od $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ do $1000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. [1]. Vliv řezné rychlosti na opotřebení bříty nože (viz obr. 3).

Posuv (f) – Je definován jako dráha, kterou vykoná nástroj za jednu otáčku obrobku. Pokud provádíme hrubování, pak je jeho hodnota $0,4 - 3,5 \text{ mm}$. U dokončovacích operací používáme hodnotu $0,06 - 0,3 \text{ mm}$ a u jemného soustružení se používá hodnota $0,03 - 0,05 \text{ mm}$. [1]

Tloušťka obráběné vrstvy (a_p) – tato hodnota se při soustružení pohybuje od několika desetin mm až po mm. Na velikost a tvar průřezu třísky mají vliv – velikost posuvu, hloubka řezu, úhel nastavení a tvar úseku řezné hrany, která je v záběru. [1].



Obrázek 3 Vliv řezných podmínek na opotřebení bříty nože [5]

1.1.4 Kvalita povrchové vrstvy soustružených obrobků

Kvalita a stav povrchové vrstvy kovu, který je obrobený, ovlivňují únavovou pevnost, odolnost proti opotřebení, protikorozi stabilitu, kvalitu montáže a jiné. Víme, že součástky, které jsou dynamicky namáhané se zpravidla začnou porušovat na povrchu. Obrobená plocha se tvoří jako obalová plocha trajektorií pracovního pohybu bodů řezné hrany nástroje a od základních geometrických ploch zadaných výkresem, tedy od roviny, válcové plochy a jiných se zásadně liší. [25]

Vliv plastické deformace na skutečný obrobený povrch se projevuje zejména na adhezních silách mezi nástrojem a obrobkem a na tvoření nárůstku. Nárůstek se odděluje od ploch řezného nástroje, lepí se na obrobený povrch a vytváří na něm vyvýšeniny. Ty se mohou v procesu řezání odtrhávat a na povrchu se objeví vytrhané plošky. [25]

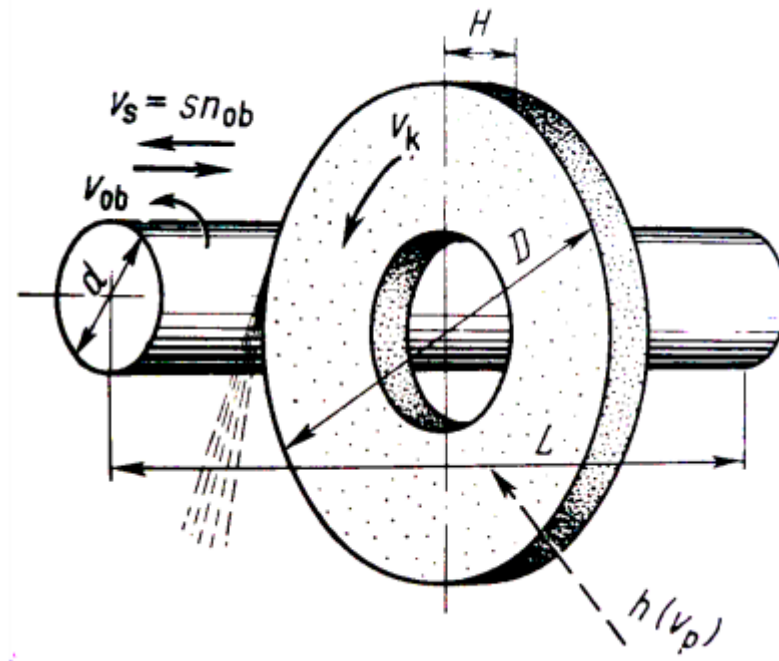
Pokud obrábíme litinu a kovy v křehkém stavu nevzniká „čisté“ řezání. Kvůli napjatosti se některá zrna odtrhávají od základního materiálu, a proto vznikají odchylky od teoretického povrchu ve tvaru nepravidelných prohloubení. [25]

Vliv kmitání se projevuje tím, že se zvyšuje teoretický sled pohybů řezné hrany, jednak má vliv na oddělování nárůstku od ploch nástroje. [25]

Vliv tření hřbetu nože o obrobek se projevuje i tím, že nerovnosti řezné hrany se promítají na obráběný povrch. [25]

1.2 Konvenční technologie soustružení - broušení

Jedná se o hromadné rychlostní mikrořezání povrchových vrstev velmi jemnými zrna brusiva. Proces probíhá při rychlostech od $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až ve zvláštních případech do $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Broušení dosahuje velkou přesnost obrábění. Broušení se také používá při předběžném obrábění polotovarů - čištění odlitků, výkovků apod. Základním způsobem broušení je broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku (obr. 4). V tomto případě je řeznou dráhou zrna šroubovitá hypocykloidní křivka a řeznou plochu tvoří soubor hypocykloidních šroubovic. [6]



Obrázek 4 Schéma broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku [6]

kde:

$v_k [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ - obvodová rychlost brousícího kotouče,

$v_{ob} [\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$ - obvodová rychlost obrobku,

$v_s [\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}]$ - podélný posuv,

$h(v_p) [\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}]$ - přísuv,

$D, d [\text{mm}]$ - průměr brousícího kotouče,

$H [\text{mm}]$ - šířka brousícího kotouče,

$L [\text{mm}]$ - délka broušené plochy obrobku [6].

U broušení vykonává hlavní pohyb nástroj. Kotouč se při této operaci stýká s obrobkem, a to buď svým obvodem, nebo čelem. Brousicí stroje pracují s malými pořezy třísek a velkými rychlostmi. Při interakci kotouče s materiálem dochází k úbytku jak materiálu obrobku, tak brusného kotouče.

Podle typu brousicího nástroje se rozlišují tyto druhy broušení:

1. vázaným pevným brusivem - zrna brusiva jsou stmelená pojivem do tvaru kotouče, brousicího tělíska, segmentu, brousicího kamene či nástroje jiného tvaru nebo zrna přilepená k pružnému podkladu, kdy řezný nástroj je ve tvaru brousicího pásu,
2. volným brusivem – využívají se zrna ve formě prášku pro broušení kapalinou, ultrazvukem nebo jiným podobným způsobem obrábění tvrdých materiálů.

Při broušení se používají různé řezné prostředky, které mají chladicí a mazací účinek v pevném, kapalném i plynném stavu. Jejich složení je různé a mají různé fyzikálně-chemické vlastnosti a ovlivňují produktivitu broušení a kvalitu broušené plochy. [7]

1.2.1 Kvalita povrchové vrstvy broušených obrobků

Velký význam pro spolehlivou funkci strojních součástí má Ra , která je charakterizovaná mikronerovností, a kvalita povrchové vrstvy, která je charakterizovaná jejím stavem (struktura, zbytkové pnutí atd.). [6]

Na Ra obrobku závisí hlavně její počáteční opotřebení součástí a kvalita povrchové vrstvy, která má zase vliv na opotřebení během provozu. Složitým fyzikálním procesem je vytváření mikrogeometrie a kvality povrchové vrstvy, při kterém na sebe vzájemně chemicky a mechanicky působí všechny zúčastněné materiály. [6]

Broušená plocha má určitou ustálenou Ra po velkém počtu průchodů brousicího kotouče s daným úsekem obrobku. Ustálená Ra závisí na geometrických parametrech a vlastnostech zrna, stupni plastické deformace a chvění technologické soustavy. [7]

Vlnitost má také velký význam kromě Ra broušeného povrchu, což je souhrn periodických a neperiodických výstupků a prohlubenin. Při broušení na čisto je nejvíce ovlivněno tvoření vln pracovními pohyby obrobku, brousicího vřeteníku, kotouče a jeho tvarovou úchylností. Na vlnitost má vliv i poměr obvodových rychlostí brousicího kotouče

a obrobku, jejich velikost, počet záběrů kotouče a fázový posun vln při dalších průchodech kotouče. [6]

Pokud se nám v jistém intervalu zvětší obvodová rychlost broušícího kotouče, zintenzivní se chvění technologické soustavy, čímž se omezuje možnost snižovat velikost vlnitosti. [6]

Kvalitu broušení značně zlepšuje broušení diamantem, jelikož tloušťky třísek odebíraných zrnem brusiva, síly a teploty jsou v porovnání s běžným broušením nižší. Pokud je broušený materiál tvrdší, tak se Ra snižuje, protože zrna diamantu pronikají méně hluboko do obráběného materiálu. Adheze a difúze vždy zvyšuje Ra , což se nejvíce projeví při broušení ocelí diamantem za obtížných řezných podmínek. [7]

Pojivo ovlivňuje tvoření mikronerovností broušeného povrchu. Diamantové kotouče s pojivem z umělé pryskyřice se vyznačují vyšší kvalitou obrobeného povrchu po broušení než kotouče s kovovým a keramickým pojivem. [7]

1.2.2 Metody broušících procesů

Broušící proces se uskutečňuje různými metodami, které můžeme definovat pro vhodná kritéria. Příslušné technologické charakteristiky se k těmto metodám vztahují. Podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření se rozlišují:

- rovinné broušení (výsledkem je rovinná plocha),
- broušení do kulata (výsledkem je rotační pohyb),
- broušení na otáčivém stole (broušení s rotačním posuvem),
- tvarovací broušení (broušení závitů, ozubených kol, apod.),
- kopírovací broušení (broušení s řízenou změnou posuvu, NC stroje),
- broušení tvarovými broušícími kotouči (profil broušícího kotouče určuje konečný profil obrobku) [8].

Podle aktivní části broušícího kotouče se specifikuje:

- obvodové broušení (broušení obvodem kotouče),
- čelní broušení (broušení čelem kotouče kolmým k jeho ose). [8]

Podle vzájemné polohy broušícího kotouče a obrobku se charakterizuje:

- vnější broušení (broušení vnějšího povrchu obrobku),
- vnitřní broušení (broušení vnitřního povrchu obrobku). [8]

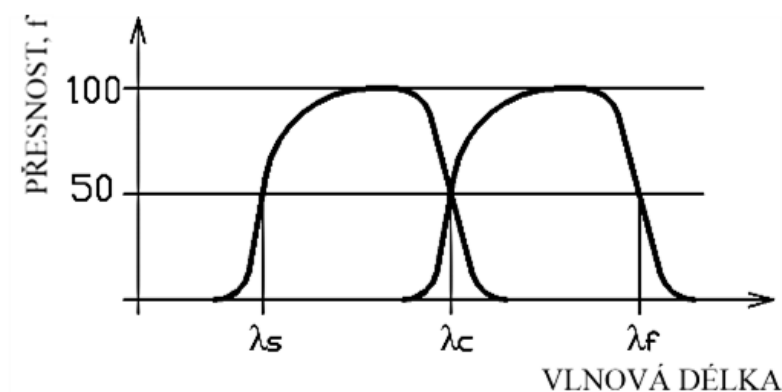
2 Termíny a definice pro profilové a plošné parametry

2.1 Profilové parametry povrchu

V roce 1930 byly vyvinuty první přístroje pro měření topografie povrchu. Se vznikem měřicích přístrojů byly vyvinuty i měřicí metody. V 60. letech již bylo možné hodnocení povrchu metodou 3D. [13] S rozvojem měřicích zařízení a metod byly přijaty normy, které nám definují geometrické požadavky na výrobky. Mezi tyto normy patří norma ČSN EN ISO 4287 [14] „*Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*“, která nám charakterizuje strukturu povrchu. Parametry profilu povrchu nám zajišťují kvantifikovanou formu popisu vlastností topografie povrchu.

2.1.1 Definice základních pojmů

Analýzu profilu povrchu provádíme separací jednotlivých složek filtrováním. Filtr profilu rozděluje profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky, jejich definice jsou uvedeny v normě ČSN ISO 16610-21 [15]. Filtry profilu jsou znázorněny na obr. 7.

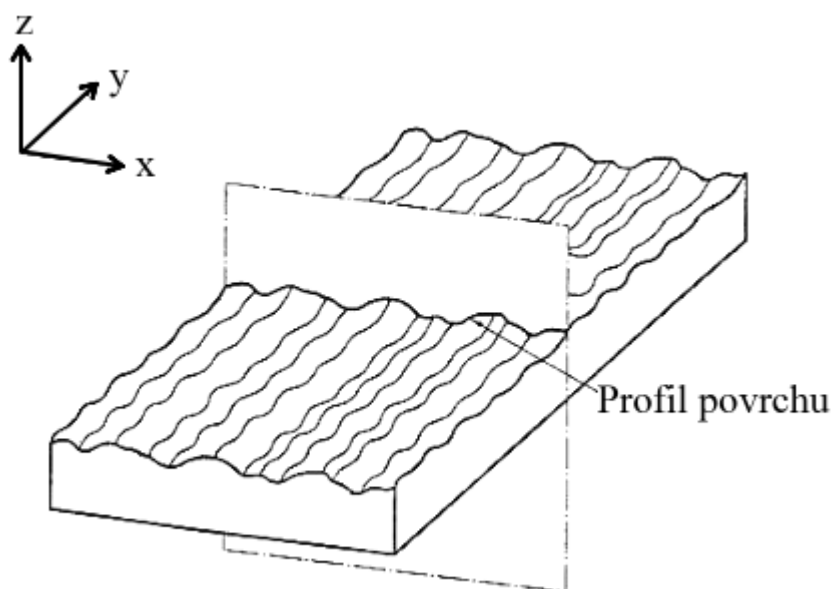


Obrázek 5 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [14]

Filtr profilu λ_s je filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomných na povrchu. **Filtr profilu λ_c** je filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti. **Filtr profilu λ_f** je filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomných na povrchu. [15]

V úvodu je zapotřebí definovat **souřadnicový systém**, ve kterém jsou definovány parametry struktury povrchu. V mezinárodní normě ČSN EN ISO 4287 [14] je využíván pravoúhlý souřadnicový systém, ve kterém osy tvoří pravotočivou kartézskou soustavu. Osa x ve směru snímání je souběžná se střední čarou, osa y leží na **skutečném povrchu**, který definujeme jako povrch omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí. Osa z směřuje z povrchu materiálu do okolního prostředí.

Profil povrchu je profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny (obr. 8). V praxi se obvykle volí rovina kolmá k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem ve vhodném směru. [14]



Obrázek 6 Profil povrchu [14]

Základní profil. Základní profil je základem pro hodnocení parametrů základního profilu. Filtry slouží k oddělení frekvenčních složek nerovností profilu povrchu. Pro získání **profilu drsnosti** je zapotřebí použít filtry λ_s a λ_c . **Profil vlnitosti** je profil odvozený postupnou aplikací profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základním profilu, protlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c ; profil je záměrně pozměněn. [14]

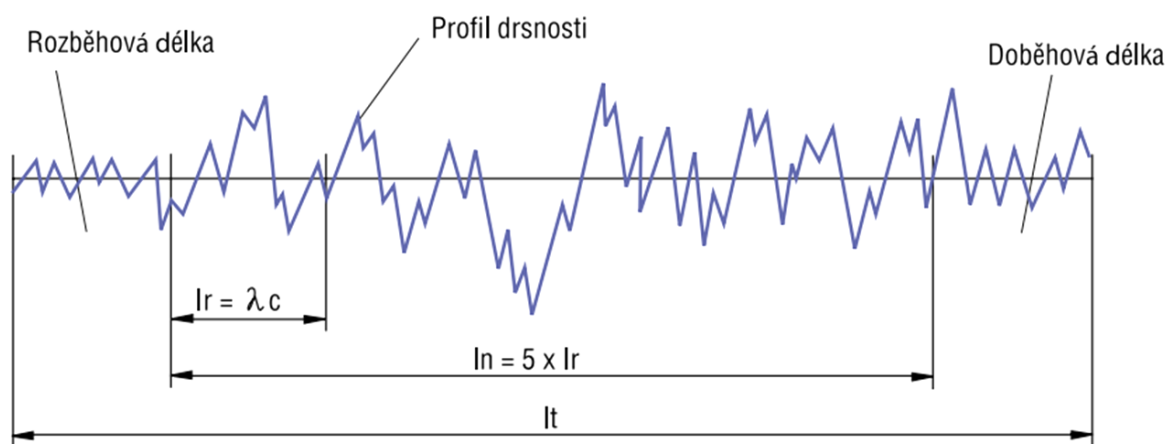
Dále je zapotřebí stanovit střední čáru profilu. **Střední čára základního profilu** je čára nejmenších čtverců přiléhající jmenovitému tvaru základního profilu. **Střední čára profilu vlnitosti** je čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λ_f . **Střední čára profilu drsnosti** je čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené

filtrem profilu λ_c (viz ČSN ISO 16610-21 [15]). Vztah mezi mezní vlnovou délkou (cut-off) drsnosti λ_c , λ_s a největší roztečí bodů profilu udává norma ČSN EN ISO 3274 [11], viz tabulka 2.

Tabulka 1 Vztah mezi mezní vlnovou délkou drsnosti (cut-off) λ_c , λ_s a roztečí snímaných bodů profilu [11]

λ_c [mm]	λ_s [μm]	Největší rozteč bodů profilu [μm]
0,08	2,5	0,5
0,25	2,5	0,5
0,8	2,5	0,5
2,5	8	1,5
8	25	5

Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu specifikuje mezinárodní norma ČSN EN ISO 4288 [16]. Tato norma stanovuje **základní délku l_r** a potřebnou **vyhodnocovanou délku l_n** drsnosti (viz obr. 9) pro měření R-parametrů periodických i neperiodických povrchů.



Obrázek 7 Základní délka l_r a vyhodnocovaná délka l_n [17]

l_r – základní délka (sampling length): délka ve směru osy X , použitá pro rozpoznání nerovností charakterizující vyhodnocovaný profil. Základní délka l_r odpovídá mezní vlnové délce λ_c . [14]

l_n – vyhodnocovaná délka (evaluation length): délka ve směru osy X , použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. [14]

l_t – celková délka: délka pohybu snímače během kterého se snímají úchylny tvaru plochy. [14]

2.1.2 Názvy geometrických parametrů

Mezi parametry profilu povrchu řadíme P-parametr (parametr vypočítaný ze základního profilu), R-parametr (parametr vypočítaný z profilu drsnosti) a W-parametr (parametr vypočítaný z profilu vlnitosti). Ve strojírenské praxi se využívají při hodnocení kvality povrchu R-parametry profilu drsnosti. [14]

Názvy dalších geometrických parametrů dle normy ČSN EN ISO 4287 [14]:

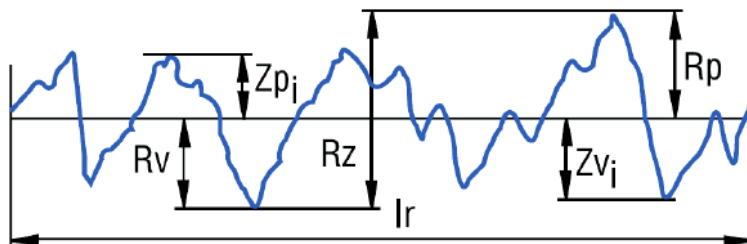
- **Výstupek profilu.** Z povrchu ven směřující (u materiálu do okolního prostředí) část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průřezu profilu s osou x .
- **Prohlubeň profilu.** Dovnitř směřující (z okolního prostředí do materiálu) část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průřezu profilu s osou x .
- **Omezení výšky a/nebo rozteče.** Nejmenší výška a nejmenší rozteč výstupků a prohlubní posuzovaného profilu, které mohou být brány v úvahu.
- **Prvek profilu.** Výstupek profilu a přilehlá část prohlubně.
- **Výška výstupku profilu – Z_p .** Vzdálenost mezi osou x a nejvyšším bodem výstupku profilu (obr. 10).
- **Hloubka prohlubně profilu – Z_v .** Vzdálenost mezi osou x a nejnižším bodem prohlubně profilu (obr. 10).
- **Výška prvku profilu – Z_t .** Součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu (obr. 11).
- **Šířka prvku profilu – X_s .** Délka úseku osy x protínající prvek profilu
- **Materiálová délka profilu na úrovni c .** Součet délek úseků získaných protnutím prvku profilu čarou rovnoběžnou s osou x v dané úrovni c .

2.1.3 Výškové parametry (výstupky a prohlubně)

Největší výška výstupku profilu – P_p , R_p , W_p [14]: Výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky (obr. 10).

Největší hloubka prohlubně profilu – P_v , R_v , W_v [14]: Hloubka Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky (obr. 10). [14]

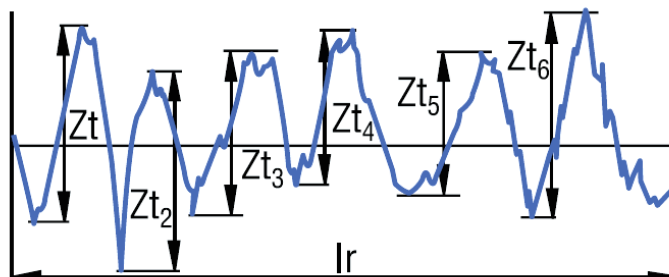
Největší výška profilu – P_z , R_z , W_z [14]: Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (obr. 10).



Obrázek 8 Největší výška profilu [17]

Průměrná výška prvků profilu – P_c , R_c , W_c [14]: Průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky (obr. 11).

$$P_c, R_c, W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{ti} \quad (1)$$



Obrázek 9 Výška prvků profilu [17]

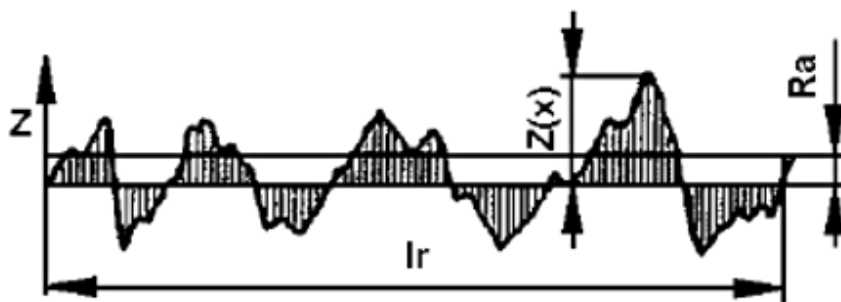
Celková výška profilu povrchu – P_t , R_t , W_t [14]: Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.

2.1.4 Výškové parametry (průměrné hodnoty souřadnic)

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu – P_a , R_a , W_a [14]: Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2)$$

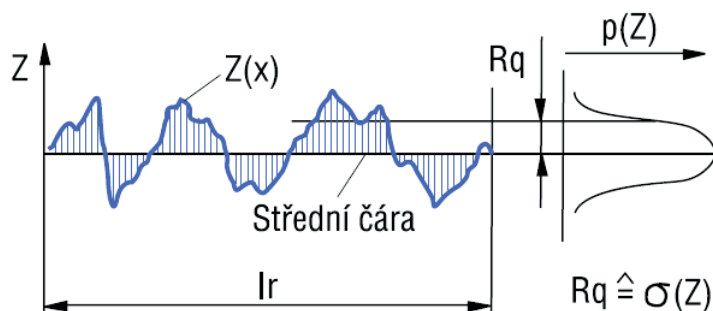
kde: $l = l_p$, l_r případně l_w

Obrázek 10 Parametr profilu drsnosti Ra [18]

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu – Pq , Rq , Wq [14]:
 Kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

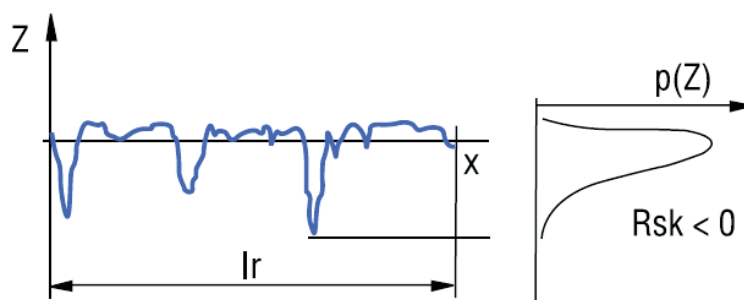
$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^{lr} |Z^2(x)| dx} \quad (3)$$

kde $l = lp, lr$, případně lw

Obrázek 11 Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu drsnosti Rq [17]

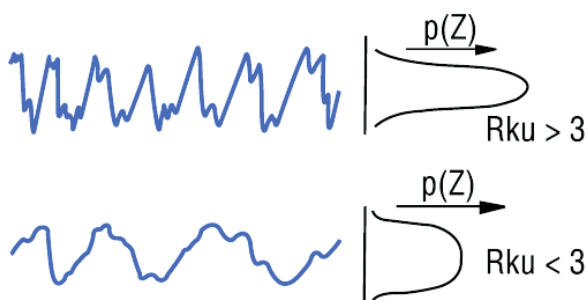
Šikmost posuzovaného profilu – Psk , Rsk , Wsk [14]: Podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Pq , Rq nebo Wq v rozsahu základní délky.

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^3 x| dx \right] \quad (4)$$

Obrázek 12 Šikmost posuzovaného profilu drsnosti Rsk [17]

Špičatost posuzovaného profilu – Pku , Rku , Wku [14]: Podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Pq , Rq nebo Wq v rozsahu základní délky.

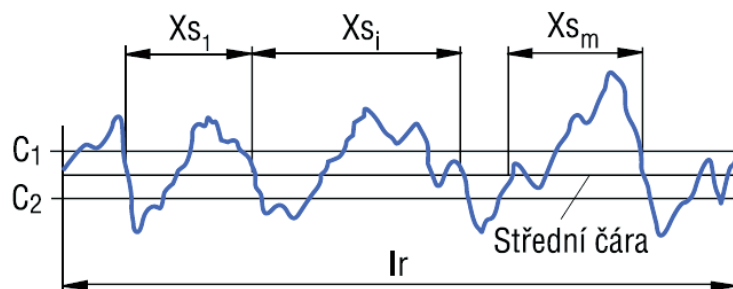
$$Rku = \frac{1}{Rq^2} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4 x| dx \right] \quad (5)$$

Obrázek 13 Špičatost posuzovaného profilu drsnosti Rku [17]

2.1.5 Délkové parametry

Průměrná šířka prvků – PSm , RSm , WSm [14]: Aritmetický průměr šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky.

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (6)$$



Obrázek 14 Střední vzdálenost rýh [17]

2.1.6 Tvarové parametry

Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu - $P\Delta q$, $R\Delta q$, $W\Delta q$ [14]: Kvadratický průměr sklonů pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky.

2.1.7 Křivky a odpovídající parametry

Materiálový poměr profilu – $Pmr(c)$, $Rmr(c)$, $Wmr(c)$ [14]: Poměr délky materiálu elementů profilu $MI(c)$ na dané úrovni c , k vyhodnocované délce.

$$Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c) = \frac{MI(c)}{ln} \quad (7)$$

Křivka materiálového poměru profilu (nosná křivka) [14]: Křivka představující materiálový poměr profilu v závislosti na výšce úrovně.

Rozdíl výšky úseku profilu - $P\partial c$, $R\partial c$, $W\partial c$ [14]: Svislá vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru.

$$R\partial c = C(Rmr1) - C(Rmr2); (Rmr1 < Rmr2) \quad (8)$$

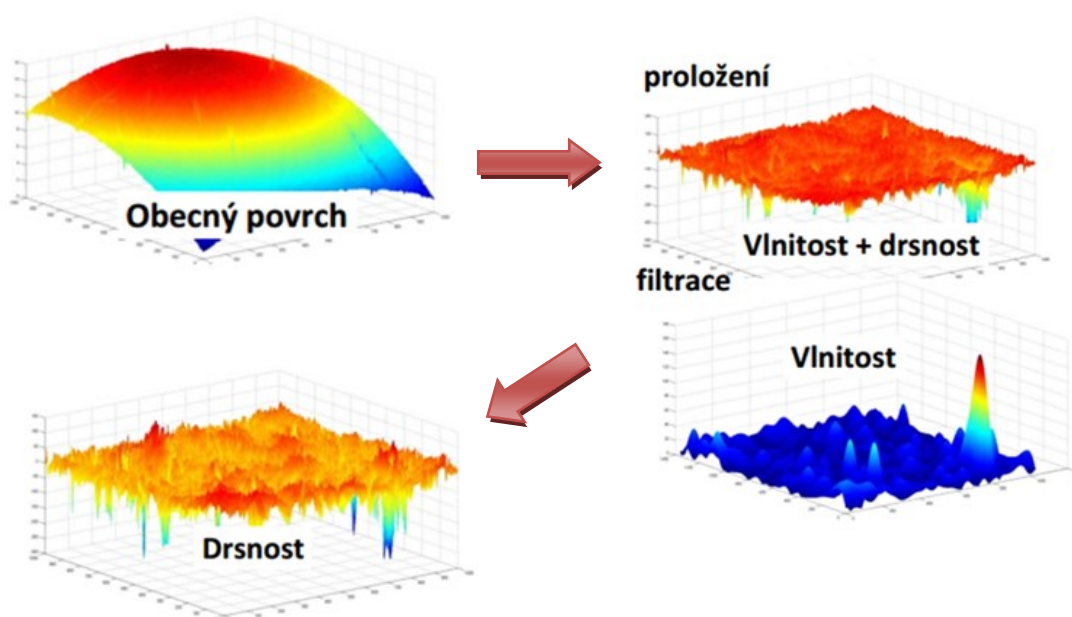
2.2 Plošné parametry povrchu

Rozvoj měřicí techniky přinesl nové možnosti v hodnocení povrchu, tzv. 3D parametry povrchu. Definice jednotlivých 3D parametrů popisuje norma ČSN EN ISO 25178-2 [19].

Plošné parametry umožňují kvantitativní hodnocení plochy všemi technicky významnými směry. V plošném hodnocení lze stanovit obecnou texturu a celkový tvar plochy, což umožňuje lépe předurčit funkční vlastnosti povrchu za provozu. [20]

2.2.1 Filtrace povrchu

Obrobený povrch lze definovat, jako soubor nerovností, které tvoří strukturu povrchu. Pomocí filtrování separujeme jednotlivé složky struktury povrchu. Znázornění postupu filtrace povrchu pro získání plošných parametrů drsnosti je uvedeno na obrázku 17.



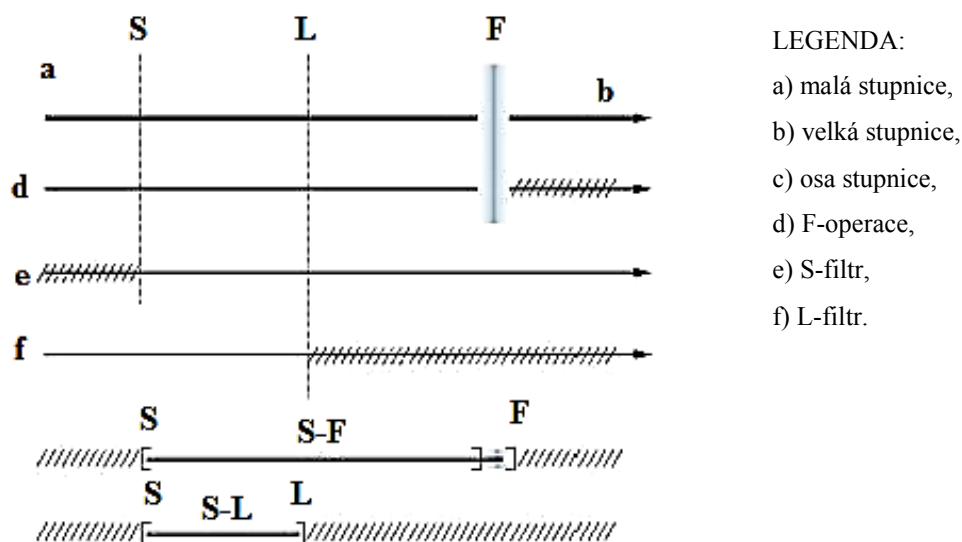
Obrázek 15 Filtrace plochy [21]

Filtry povrchu dělíme dle ČSN EN ISO 25178-2 [19] na:

- **S-filtr.** Filtr povrchu, který odstraní malou laterální stupnici z povrchu, což je předpoklad pro dosažení primárního povrchu.
- **L-filtr.** Filtr povrchu, který odstraní velkou laterální stupnici z primárního povrchu nebo S-F povrchu.

- **F-operace.** Operace, která vyloučí vliv tvaru primárního povrchu.

Některé F-operace mají velmi rozdílně akce filtrace. Prostřednictvím jejich akce může být omezena velká laterální stupnice povrchu, tato akce je velmi nejasná, je tedy nejasná i přímka pro akci F-operace (obr. 18). Mnoho L-filtrů je citlivých na tvar a požaduje nejdříve F-operaci jako předfiltr před samostatným jejich použitím. [19]



Obrázek 16 Vztahy mezi S-filtrem, L-filtrem, F-operací a S-F a S-L povrchy [19]

Na naměřený povrch je aplikován S-filtr, který z povrchu odstraní prvky s velmi krátkou prostorovou vlnovou délkou. Po použití S-filtru vznikne tzv. primární povrch. Dále je na primární povrch aplikována F-operace, která na základě metody nejmenších čtverců vyloučí vliv tvaru z primárního povrchu. Po aplikaci S-filtru a F-operace vznikne tzv.

S-F povrch. Na S-F povrch může být dále aplikován L-filtr, který z povrchu odstraní prvky s dlouhou prostorovou vlnovou délkou. Vznikne tedy **S-L povrch** odvozený od S-F povrchu vyloučením vlivu velké stupnice při použití L-filtru. Na obrázku 18 jsou znázorněny vztahy mezi jednotlivými filtry a operacemi. [20]

Norma ČSN EN ISO 25178-3 [22] nám říká, jak všeobecně postupovat při filtrování povrchu. Jsou zde tabulky, které nám slouží k určení S a F-filtru a F-operací. Záleží na tom, jakou metodu měření při nasnímání povrchu použijeme. Pro povrchy měřené optickou metodou se používá tabulka 3 (str. 11) v literatuře [22]. V tabulce vybereme maximální laterální periodu meze, na jejímž základu pak stanovíme maximální

vzorkovací vzdálenost, a tím zjistíme hodnotu S-filtru indexu vnoření. Když známe hodnotu S-filtru indexu vnoření, můžeme určit pomocí tabulky 1 (str. 9) [22] hodnotu F-operace nebo L-filtru. Správná volba filtrů je nezbytný předpoklad pro získání skutečných hodnot plošných parametrů.

2.2.2 Termíny geometrického parametru a prvku

Mezi termíny geometrického parametru patří [19, 23]:

- **Parametr pole:** Parametr stanovený ze všech bodů v omezené stupnici povrchu.
- **Parametr prvku:** Parametr stanovený z podmnožiny předurčených topografických prvků z omezení stupnice povrchu.
- **V-parametr:** Objem materiálu nebo zrušený objem pole nebo parametr prvku.
- **S-parametr:** Pole nebo parametr prvku, který není V-parametrem.
- **Výška:** Vyznačená kolmá vzdálenost z referenčního povrchu k omezení stupnice povrchu. Vzdálenost je stanovena kolmo k referenčnímu povrchu. Výška je záporná, pokud bod leží od referenčního povrchu ve směru materiálu.

Mezi termíny geometrického prvku patří [19, 23]:

- **Pik:** Bod na povrchu, kdy je vyšší než všechny ostatní body v jeho okolí.
- **Prohlubeň:** Nejnižší bod na povrchu, který je nižší než všechny body v jeho okolí.
- **Sedlo:** Sada bodů na omezené stupnici povrchu, kde se kříží hřebenové přímky a přímky kurzu.
- **Topografický prvek:** Plocha, přímka nebo bod prvku vymezující stupnici povrchu.
- **Obrysová přímka:** Přímka na povrchu sestávající z bodů stejné výšky.
- **Segmentace:** Metoda, která odděluje omezenou stupnici povrchu od odlišných oblastí.
- **Výška piku**
- **Hloubka prohlubně.**

2.2.3 Výškové parametry

Všechny výškové parametry jsou stanoveny na základně určené plochy [24].

Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu – S_q [19]:

Vymezení průměrné hodnoty čtverce hodnot koordinace uvnitř plochy definice (A).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (9)$$

Šikmost omezené stupnice povrchu – S_{sk} [19]: Kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot a krychle S_q uvnitř určené plochy (A).

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (10)$$

Špičatost omezené stupnice povrchu – S_{ku} [19]: Kvocient průměrné čtvrté mocniny hodnoty koordinace a hodnoty čtvrté mocniny S_q uvnitř určené plochy (A).

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (11)$$

Maximální výška piku omezené stupnice povrchu – S_p [19]: Největší hodnota výšky piku uvnitř určené plochy.

Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu – S_v [19]: Hloubka prohlubně uvnitř určené plochy zmenšená o její nejmenší hodnotu.

Maximální výška omezené stupnice povrchu – S_z [19]: Součet maximální hodnoty výšky piku a maximální hodnoty hloubky prohlubně uvnitř určené plochy.

Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu – S_a [19]: Aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř určené plochy (A).

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (12)$$

2.2.4 Prostorové parametry

Všechny prostorové parametry jsou stanoveny v rozsahu určené plochy [24].

Délková autokorelace – *Sal* [19]: Horizontální vzdálenost $f_{ACF}(t_x, t_y)$, u které dochází nejrychlejšímu rozpadu specifikované hodnoty s , $s, 0 \leq s < 1$.

Poměr aspektu textury – *Str* [19]: Poměr horizontální vzdálenosti $f_{ACF}(t_x, t_y)$, u které dochází nejrychlejšímu rozpadu specifikované hodnoty s vzhledem k horizontální vzdálenosti $f_{ACF}(t_x, t_y)$, která má nejpomalejší rozpad k s , $s, 0 \leq s < 1$.

2.2.5 Hybridní parametry

Základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnicí povrchu – *Sdq* [19]: Základ průměrného čtverce povrchu gradientu uvnitř plochy (A) omezené stupnicí povrchu.

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy} \quad (13)$$

Poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu – *Sdr* [19]: Poměr přírůstku mezifázové plochy omezené stupnice povrchu uvnitř určené plochy (A) v rozsahu určené plochy.

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2} + \sqrt{\left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} \right) - 1 \right] dx dy \quad (14)$$

2.2.6 Funkční a související parametry

Poměr funkce plochy materiálu omezené stupnicí povrchu [19]: Funkce reprezentující poměr funkce plochy materiálu omezené stupnicí povrchu formou funkce výšky.

Poměr plochy materiálu omezené stupnicí povrchu – *Smr(c)* [19]: Poměr plochy materiálu ve specifikované výšce c k ploše hodnocení. $Smr(c)$ je obvykle vyjádřen v procentech. Výška je dána od referenční roviny.

Opačný poměr plochy materiálu omezené stupnicí povrchu – $S_{mc}(mr)$ [19]:
Výška c , ve které je vyhovující daný poměr plochy materiálu (mr). Výška je dána od referenční roviny.

Parametr plochy pro rozvrstvenou omezenou funkční stupnici povrchů [19]:
Parametr představující poměr plochy materiálu rozvrstvené funkčním omezením stupnice povrchu, kterou je funkce výšky.

Neplatný objem – $V_v(p)$ [19]: Objem neplatné jednotkové plochy v daném poměru materiálu vypočtený z poměru materiálu křivky.

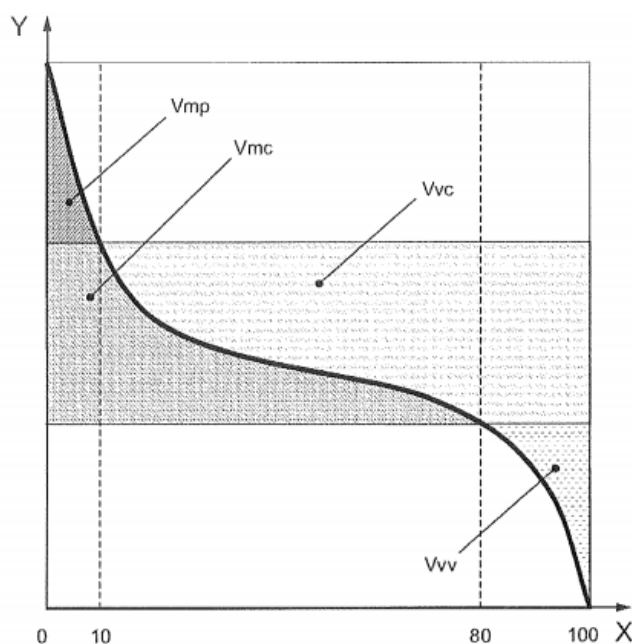
$$V_v(p) = \frac{K}{100\%} \int_p^{100\%} [S_{mc}(p) - S_{mc}(q)] dq \quad (15)$$

kde K je konstanta k převodu milimetrů na metry na druhou.

Objem materiálu – $V_m(p)$ [19]: Objem materiálu na jednotku plochy v daném poměru materiálu vypočteném z poměru materiálu plochy křivky, viz obrázek 19 kde X je poměr plochy materiálu, v procentech a Y je výška.

$$V_m(p) = \frac{K}{100\%} \int_0^p S_{mc}(q) - S_{dc}(p) dq \quad (16)$$

kde K je konstanta k převodu milimetrů na metry na druhou.



Obrázek 17 Neplatný objem a parametry objemu materiálu [19]

Extrémní výška piků – S_{xp} [19]: Rozdíl ve výšce mezi poměrem materiálu p a q .

$$S_{xp} = S_{mc}(p) - S_{mc}(q) \quad (17)$$

Gradient hustoty funkce [19]: Hustota funkce vypočtená z omezené stupnice povrchu znázorňující relativní frekvenci proti úhlu nejstrmějšího gradientu $\alpha(x,y)$ a směru nejstrmějšího gradientu $\beta(x,y)$ proti směru hodinových ručiček vzhledem k ose x .

2.2.7 Smíšené parametry

Směr textury omezené stupnice povrchu – Std . Úhel, s ohledem na specifikovaný směr absolutní minimální hodnoty úhlového spektra.

2.2.8 Parametry pojmenovaného prvku

V položkách uvedených níže se každý následující termín uvádí na základě jeho parametru ve zkráceném termínu, což je jeho označení.

Hustota piků – Spd [19]: Je to počet piků na jednotku plochy.

Aritmetický průměr zakřivení piků – Spc [19]: Aritmetický průměr principu zakřivení piků uvnitř plochy definice.

Deset bodů výšky povrchu – $S10z$ [19]: Jedná se o průměrnou hodnotu výšky pěti piků s největší globální výškou piků přidáno k průměrné hodnotě výšky pěti piků s největší globální výškou piků uvnitř určené plochy.

3 Metody měření topografie povrchu

Všechny používané technologické metody při obrábění zanechávají na povrchu nerovnosti, které mají velký význam pro topografii povrchu materiálu. Pokud chceme vytvořit nový povrch, je to závislé na mnoha faktorech, jako jsou vlastnosti použitého materiálu, pracovní podmínky, použité nástroje, obráběcí stroje a další technologické parametry.

Na počátku 20. století se vyvinuly první přístroje pro kontrolu, posuzování a hodnocení splnění předepsaných požadavků na topografii obrobeného povrchu. Důležitý pokrok se projevil při uplatnění digitálních metod v 60. letech, které umožňovaly hodnocení povrchu metodou 3D.

Metody a přístroje pro měření topografie povrchu lze zjednodušeně rozdělit na kontaktní metody a optické metody.

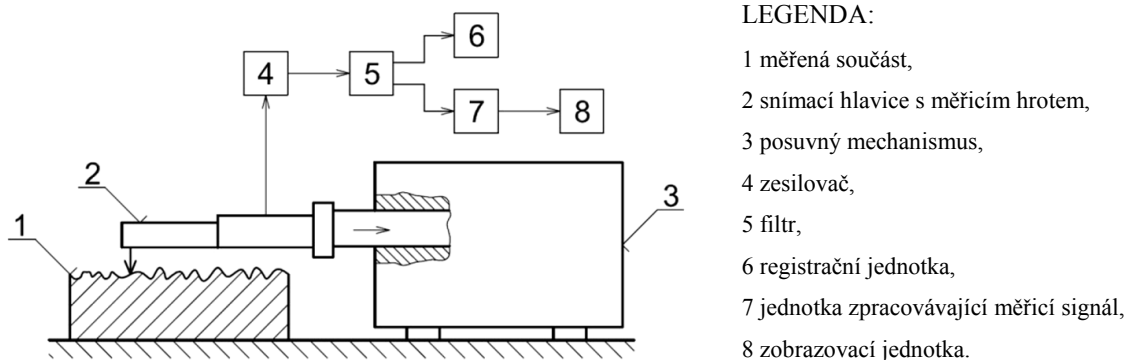
3.1 Kontaktní metody měření

Mechanické (kontaktní) metody řadíme mezi nejčastější metody, které se používají ve strojírenské praxi. Mezi hlavní výhodu této metody patří: přímé měření a schopnost zobrazit měřený geometrický profil. Naměřené hodnoty se využívají jako vztažné nebo srovnávací hodnoty pro jiné (bezkontaktní) metody měření. Kontaktní metodu měření můžeme použít pro všechny typy povrchů. Nicméně při měření dochází k elastické a plastické deformaci v povrchové vrstvě v důsledku tlaku na hrot snímače. Hrot snímače nám nenávratně poškodí měřený povrch. Na měřeném povrchu se vytvoří stopa po trajektorii snímacího hrotu, což je nevhodné pro hodnocený povrch. V důsledku toho není vhodné provádět kontrolní měření na již snímané části povrchu. Za další nevýhodu kontaktních metod lze považovat relativně malý pohyb hrotu po měřeném povrchu. [9]

Kontaktní profilometr

Kontaktní profilometr (obr. 5) se skládá ze dvou základních částí, a to mechanické a elektronické části. Pomocí přímého kontaktu diamantového hrotu s povrchem součásti je vertikální pohyb hrotu převeden na elektrický signál, který je následně transformován na digitální signál, jehož výstup je možno analyzovat na připojeném počítači. Mechanická část se tedy skládá ze stolku, kde se umístí vzorek. Po stolku se svisle posouvá zařízení s ramenem opatřeným snímačem. Snímač má tvar hrotu. Elektronická část transformuje

mechanický signál generovaným snímacím hrotem na signál elektrický, který se po zpracování interpretuje jako číselná hodnota zvoleného parametru struktury povrchu, popř. jako grafický záznam [10]. Profilové měření kontaktní (dotykovou) metodou je stanoveno normou ČSN EN ISO 3274. [11]



Obrázek 18 Schematické znázornění principu kontaktního profilometru [10]

3.2 Bezkontaktní metody měření

Optické metody se zařazují mezi alternativní měření topografie povrchu k měření dotykovými profilometry. Optické profilometry mají zpravidla vyšší efektivitu a operativnost než u mechanických, protože dokáží nedestruktivně a bezkontaktně měřit povrchy mikrostruktury, především při potřebě měření online. Hodnocení struktury je založeno na interakci světla s nerovnostmi povrchu. Optické metody mají schopnost světelným paprskem nepřímou kopírovat zdrsňený povrch a vyhodnocovat nám velký počet technicky užitečných informací o jeho charakteru. Měřicí postupy jsou především jednoduché a rychlejší než u kontaktních profilometrů. Používáme je k měření menších ploch, podle zvětšení lze měřit plochy v řádu několika mm až po mikronovou oblast. Velkou výhodou je, že můžeme dostat plošné 3D informace v krátkém časovém intervalu, kde nám nehrozí poškození povrchu. [10]

Optický profilometr MicroProf FRT

Optický profilometr MicroProf FRT (viz obr. 6), je zařízení, které dokáže měřit nejen povrch profilu, ale i skenování plochy zkoumaného povrchu materiálu. Měřicí senzor je uchycen na konstrukci zařízení a může se pohybovat pouze v ose z . Vzorek je umístěn na odměřovacím stolku a ten nám zajišťuje přesný pohyb definovanou rychlostí ve směru os x a y . Trojrozměrný obraz povrchu, který získáme, nám umožňuje provést rozsáhlejší analýzu textury povrchu, jako může být například výpočet objemového úběru materiálu.

Optická metoda je vytvořena na principu bílého světla, které se ze zdroje přivádí optickým vláknem ke spojné čočce. Spojná čočka nám zaostřuje jednotlivé monochromatické složky bílého světla do různé výšky nad vztažnou rovinou. Zaostřené světlo je po dopadu na studovaný povrch vzorku odraženo zpět do čočky a optickým vláknem přivedeno do spektrometru. Hodnota vlnové délky maxima intenzity světla vystupujícího ze spektrometru je pomocí kalibrační tabulky převedena na hodnotu vzdálenosti mezi senzorem a povrchem vzorku. Díky tomu je získávána informace o výškové nerovnosti povrchu. Technické specifikace prezentovaného optického profilometru MicroProf FRT jsou uvedeny v tabulce 1. [12]



Obrázek 19 Optický profilometr MicroProf FRT

Tabulka 2 Technické parametry optického profilometru MicroProf FRT

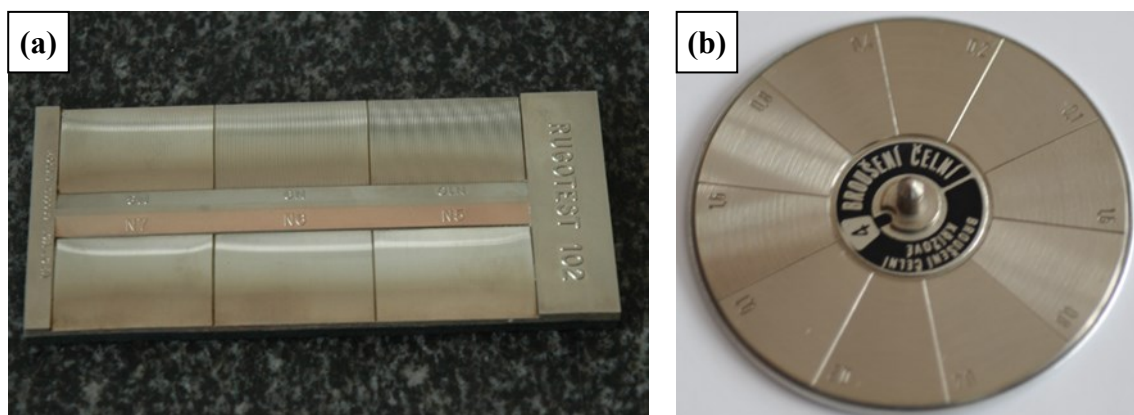
Pracovní rozsah zařízení	
Osa x [mm]	200
Osa y [mm]	200
Osa z [mm]	50
Rozlišení nastavení os měřicího zařízení x, y, z [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	0,001
Přesnost nastavení polohy [mm]	$\pm 0,001$
Min. vzdálenost mezi měřícími body $\Delta X, \Delta Y$ [μm]	0,6
Max. rozměr měřeného vzorku [mm^3]	310 x 210 x 50
Max. hmotnost měřeného vzorku [kg]	5
Hmotnost přístroje [kg]	520
Doporučená pracovní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	20 ± 2

4 Experimentální část

V experimentální části je uveden popis vzorků použitých pro porovnání vybraných profilových a plošných parametrů drsnosti. Měření se uskutečnilo na Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. Pro snímání povrchů byl použit optický profilometr MicroProf FRT. Analýza naměřených dat byla provedena pomocí softwaru SPIP.

4.1 Popis vzorků

Pro experimentální část byl použit etalon vzorkovnice soustružení RUGOTEST 102 od firmy Rugotest, a etalon vzorkovnice SUPRAPHON VP 030 – č. 4 od firmy Tesla Valašské Meziříčí, viz obr. 20.



Obrázek 20 Vzorkovnice: (a) soustružení RUGOTEST 102, (b) broušení SUPRAPHON

Na vzorkovnici RUGOTEST 102 se nachází 6 vzorků s označením N5–N10 (hodnoty parametru drsnosti R_a jsou $0,4\text{ }\mu\text{m}$; $0,8\text{ }\mu\text{m}$; $1,6\text{ }\mu\text{m}$; $3,2\text{ }\mu\text{m}$; $6,3\text{ }\mu\text{m}$ a $12,5\text{ }\mu\text{m}$). Čím má povrch vzorku větší hodnotu parametru R_a , tím je označen vyšším číslem. Měřeny byly povrchy vzorků s označením N6 ($R_a = 0,8\text{ }\mu\text{m}$), pro účely této práce označen jako vzorek č. 1 a N7 ($R_a = 1,6\text{ }\mu\text{m}$) vzorek č. 2. Výrobce definované parametry drsnosti profilu pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tab. 3. Pro měření byla na každém povrchu vzorku vymezená plocha $5\times 5\text{ mm}$, která byla dále vyhodnocována. Plochy byly vymezeny v okrajové části vybraných soustružených povrchů z důvodu toho, že je povrch jednotlivých vzorků ve středové části poškozen dřívější manipulací.

Tabulka 3 Výrobce definované hodnoty parametrů drsnosti vzorkovnice soustružení

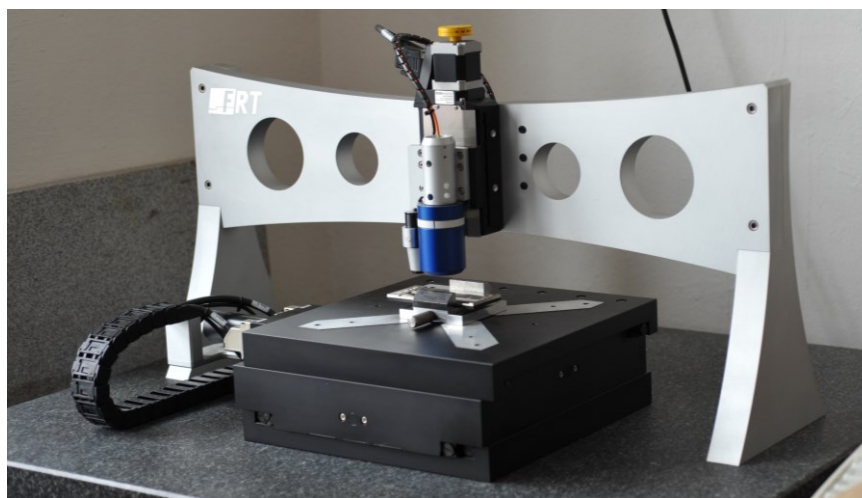
		Vzorek č. 1	Vzorek č. 2			
	N5	N6	N7	N8	N9	N10
Ra [μm]	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5
Rp [μm]	0,8	1,6	3,2	6,3	16	32
Rz [μm]	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50

Vzorkovnice SUPRAPHON VP 030 – č. 4 se používá jako etalon pro broušení čelní obloukové a křížové. Na vzorkovnici se nachází 10 vzorků, které jsou označeny dle výrobcem definované hodnoty parametru drsnosti Ra (0,1 μm; 0,2 μm; 0,4 μm; 0,8 μm a 1,6 μm) pro broušení čelní obloukové a stejně i pro broušení křížové. Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra je u vzorkovnice broušení jediný výrobcem definovaný parametr drsnosti. Měřeny byly povrchy vzorku č. 3 ($Ra = 0,8$ μm) a vzorku č. 4 ($Ra = 1,6$ μm).

4.2 Měření vzorků pomocí optického profilometru MicroProf FRT

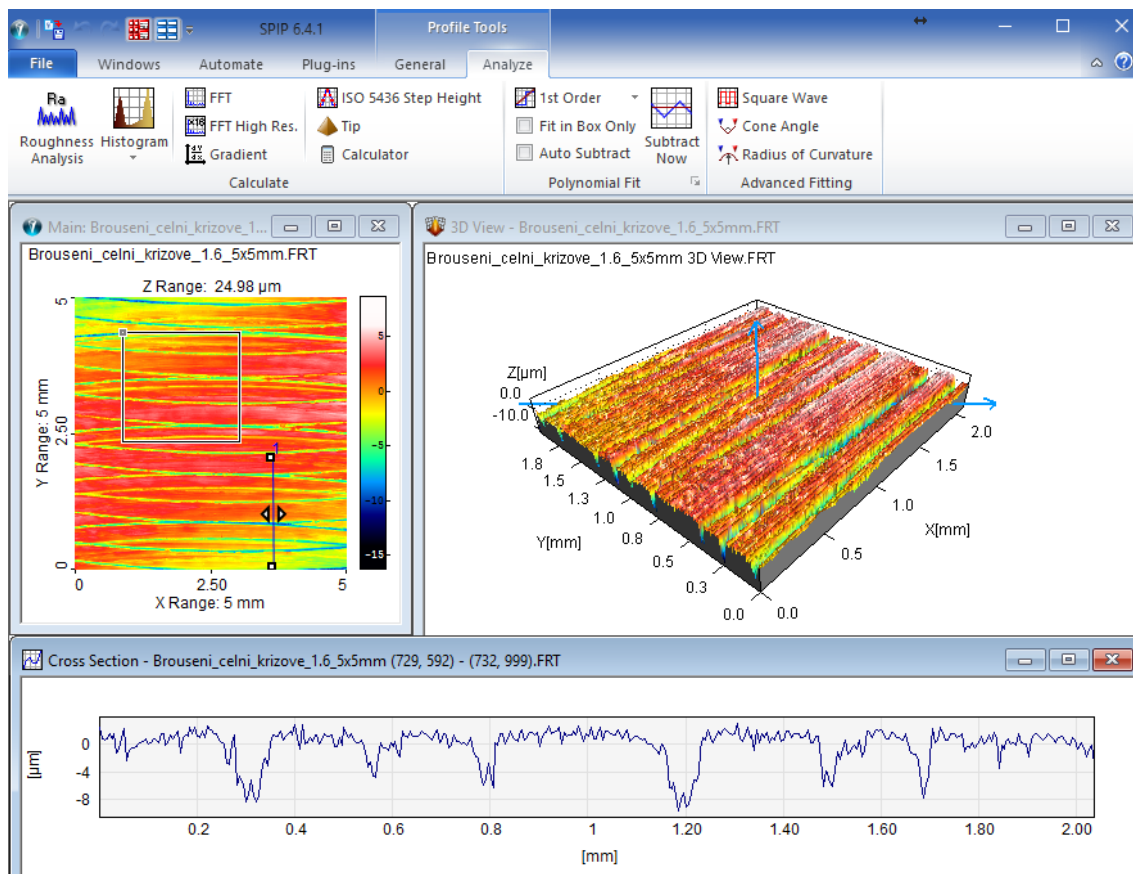
Vybrané povrchy vzorkovnice soustružení a broušení byly měřeny optickým profilometrem MicroProf FRT (obr. 21), který užívají na oddělení Desintegrace materiálů Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., Ostrava. Princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT je blíže popsán v předchozí kapitole 2, kde jsou uvedeny i technické specifikace přístroje.

Při měření byl vzorek umístěn na pohyblivém skenovacím stolku pod nepohybujícím se senzorem. Skenovací stolek se pohyboval v definovaných liniích. Celkový počet měřených linií byl 1000 a vzdálenost mezi liniemi byla 5 μm.



Obrázek 21 Optický profilometr MicroProf FRT

Při měření byla u vzorků č. 1, 2, 3 a 4 nasnímana čtvercová plocha 5 x 5 mm. Získané údaje o textuře studovaného povrchu naměřeného prostřednictvím paprsku bílého světla byly zpracovány pomocí programu SPIP, pomocí kterého byla provedena rozsáhlá analýza těchto dat. Pracovní prostředí programu SPIP je zobrazeno na obrázku 22.

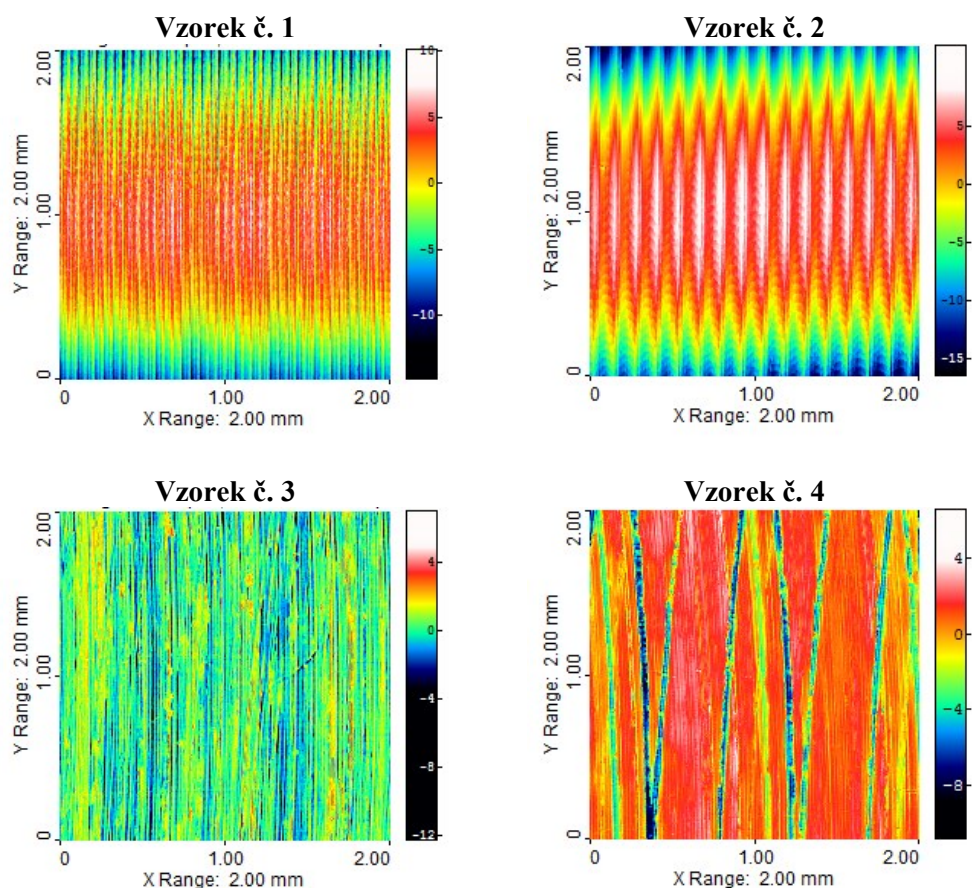


Obrázek 22 Ukázka pracovního prostředí softwaru SPIP

4.3 Analýza zkoumaných povrchů pomocí profilových parametrů

Pro více parametrové hodnocení topografie byly zvoleny vzorky, které byly obrobena rozdílnou technologií obrábění. Studované povrchy byly vybrány tak, aby bylo možné jejich vzájemné porovnání. Z těchto důvodů byly vybrány povrchy vzorkovnice soustružení a frézování s definovaným parametrem drsnosti Ra 0,8 μm a 1,6 μm . Hodnocení povrchu pouze jedním parametrem drsnosti má nízkou vypovídací schopnost.

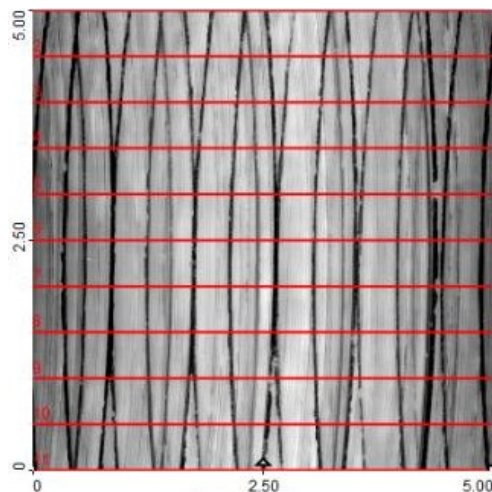
Jak vidíme na obrázku 23, kde je zobrazen nasnímaný povrch o rozměrech 2 x 2 mm vzorků č. 1 až 4, jedná se o zcela rozlišné povrchy. Barevná škála u jednotlivých obrázků udává výškový rozdíl nasnímaného povrchu v mikrometrech. Je zde vidět nejen stopa po obráběcím nástroji, ale i tvar výsledného povrchu (válec u soustruženého povrchu).



Obrázek 23 Zkoumané soustružené (vzorek č. 1 a 2) a broušené povrchy (vzorek č. 3 a 4)

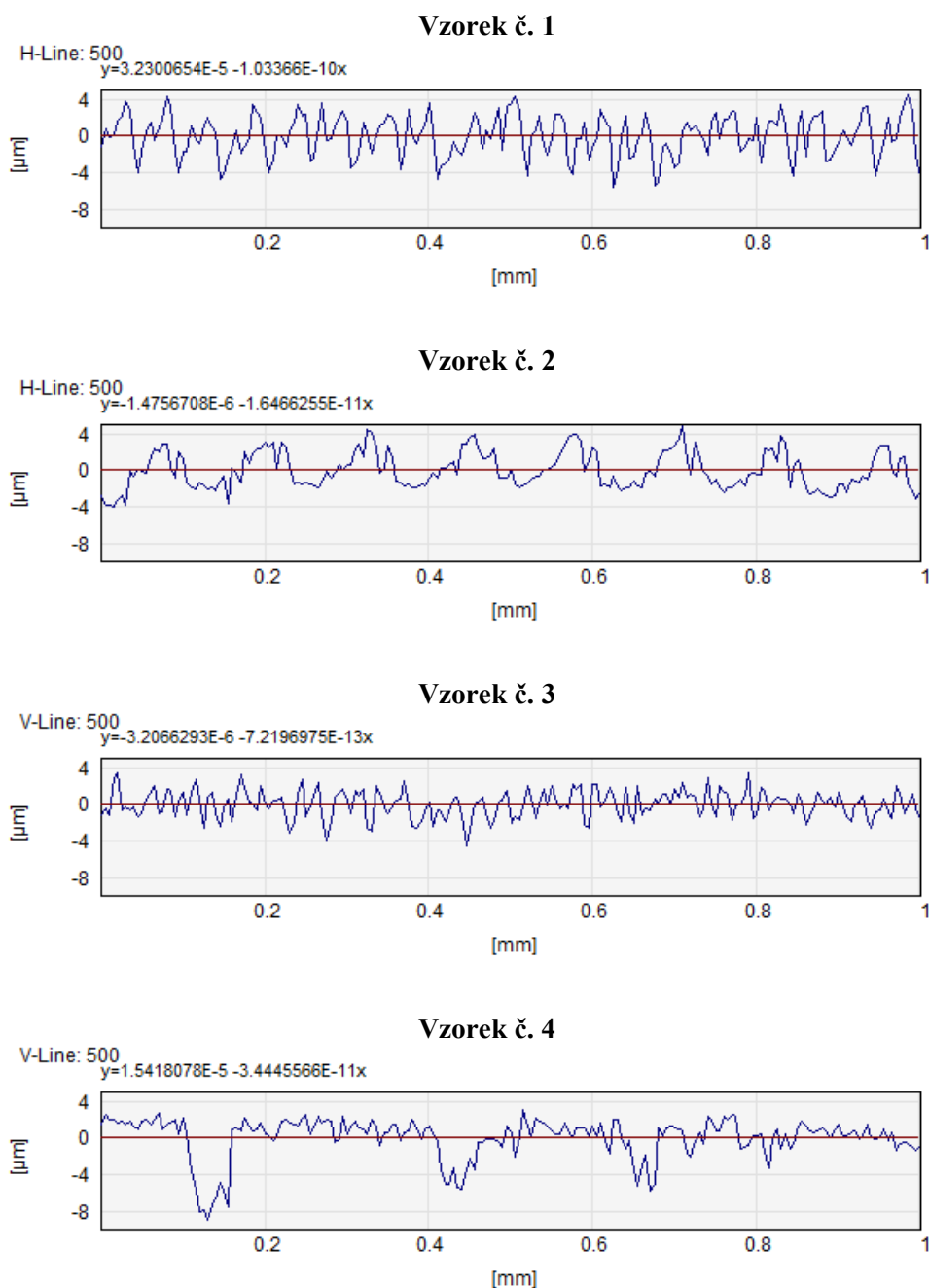
Pro zajištění dostatečného množství naměřených dat, bylo z nasnímané plochy vzorků č. 1–4 vybráno celkem 11 profilů s ekvidistantní vzdáleností 0,5 mm (viz obr. 24).

Analýza dat byla provedena v programu SPIP. Pro výpočet profilových parametrů drsnosti definovaných dle normy ČSN EN ISO 4287 [14] byla nastavena hodnota cut-off filtru $\lambda_c = 0,8$ mm.



Obrázek 24 Ukázka rozmístění 11 vyhodnocovaných profilů na ploše vzorku č. 4

Topografie povrchů vytvořených konvenční technologií obrábění soustružení a broušení jsou značně rozdílné. Na obrázku 25 vidíme profily o délce 1 mm ze zkoumaných povrchů. Přičemž základní délka l_r pro vyhodnocení profilových parametrů drsnosti je pro zkoumané povrchy $l_r = 0,8$ mm. Pro vyhodnocení parametrů drsnosti byly použity profily z povrchu vzorku č. 1 až 4 o délce 5 mm, tak aby byly splněny požadavky normy ČSN EN ISO 4288 [16] o vyhodnocované délce drsnosti l_n [mm], která je rovna 5-ti násobku základní délky l_r ($l_n = 5l_r = 5 \cdot 0,8 = 4$ mm).



Obrázek 25 Profily zkoumaných soustružených (vzorek č. 1 a 2) a broušených povrchů (vzorek č. 3 a 4)

Více parametrové hodnocení zajišťují zvolené parametry drsnosti profilu Ra , Rz , Rv , Rp a délkový parametr drsnosti RSm , definice uvedených parametrů byly blíže popsány v kapitole 3. Stanovené hodnoty profilových parametrů drsnosti jsou zapsány v tabulkách 4 až 7. Ze získaných hodnot v tabulkách byla zjištěna pro každý parametr průměrná hodnota \bar{x} , maximální a minimální hodnota, směrodatná odchylka σ (18).

Směrodatná odchylka

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (18)$$

n – pořadí měření

x_i – naměřené hodnoty parametrů drsnosti

Tabulka 4 Profilové parametry drsnosti soustruženého povrchu, vzorek č. 1

	Vzorek č. 1				
profil č.	Ra [μm]	Rz [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]	RSm [mm]
1	1,84	9,69	4,25	5,44	0,05
2	2,08	10,85	4,34	6,5	0,05
3	2,33	11,84	4,82	7,02	0,05
4	2,54	12,98	5,26	7,72	0,05
5	2,45	13,02	5,72	7,3	0,05
6	2,01	11,2	4,91	6,29	0,05
7	1,65	9,32	4,3	5,03	0,05
8	1,42	7,77	3,56	4,21	0,05
9	1,46	8,51	4,39	4,12	0,05
10	1,41	7,95	3,8	4,15	0,05
11	1,42	7,92	3,8	4,12	0,05
\bar{x}	1,87	10,1	4,47	5,63	0,05
max	2,54	13,02	5,72	7,72	0,05
min	1,41	7,77	3,56	4,12	0,05
σ	0,41	1,90	0,63	1,33	0,00

Volba nejčastěji užívaného parametru pro posuzování drsnosti profilu Ra byla podpořena faktem, že je tento parametr zahrnutý v přesnosti použité normy ve výkresové dokumentaci v případě, kdy není zadána konkrétní drsnost dané plochy. Statisticky se jedná o velmi stabilní a opakovatelný parametr, který ovšem nedokáže dostatečně reagovat na lokální výškové rozdíly profilu zkoumaného povrchu. Z těchto důvodů byly voleny další výškové parametry profilu Rz , Rp a Rv , které společně tvoří silnou skupinu parametrů, jejich výsledné hodnoty mají optimální vypovídací schopnost pro námi

zkoumané povrchy. Délkový parametr profilu drsnosti RSm je důležitý parametr pro periodicky se opakující povrchy jako jsou právě soustružené povrchy. Důležitost zvolených parametrů drsnosti dokládá i norma ČSN EN ISO 4288 [16]. Zde jsou zapsány pravidla a postupy pro měření profilu drsnosti, kde na základě parametrů drsnosti Ra , Rz a RSm je volena základní délka drsnosti lr a vyhodnocovaná délka drsnosti ln .

V tabulce 3 jsou výrobcem definované hodnoty parametrů drsnosti vzorkovnice soustružení pro vzorek č. 1 $Ra = 0,8 \mu\text{m}$, $Rp = 1,6 \mu\text{m}$, $Rz = 3,2 \mu\text{m}$. Vypočítané průměrné hodnoty uvedené v tabulce 4 jsou pro $Ra = 1,87 \mu\text{m}$, $Rp = 4,47 \mu\text{m}$, $Rz = 10,1 \mu\text{m}$. Při bližším prostudování tabulky 4 je patrné, že nejvyšší zjištěné hodnoty parametru Rz byly u profilu č. 3 až 5. Avšak parametr RSm má u všech analyzovaných profilů hodnotu $0,05 \text{ mm}$. Podle normy ČSN EN ISO 4288 je pro parametr $RSm \leq 0,13 \text{ mm}$ základní délka drsnosti $0,25 \text{ mm}$, stejně jako pro parametr $Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$ [16]. Z těchto zjištění lze usuzovat, že původní povrch vzorkovnice u vzorku č. 1 dosahoval deklarovaných hodnot u zmíněných parametrů drsnosti (Ra , Rp a Rz). Jelikož se jedná o vzorkovnici soustružených povrchů, která je roky využívána pro studijní účely na VŠB – TU Ostrava, je zřejmé, že při opakovaném měření povrchu pomocí kontaktního profilometru došlo k opotřebení povrchu. Toto opotřebení se projevilo na všech sledovaných výškových parametrech profilu drsnosti.

Tabulka 5 Profilové parametry drsnosti soustruženého povrchu, vzorek č. 2

	Vzorek č. 2				
profil č.	$Ra [\mu\text{m}]$	$Rz [\mu\text{m}]$	$Rp [\mu\text{m}]$	$Rv [\mu\text{m}]$	$RSm [\text{mm}]$
1	1,64	7,74	4,12	3,62	0,13
2	1,64	7,72	4,22	3,5	0,12
3	1,63	7,48	3,98	3,5	0,13
4	1,64	7,66	4,34	3,32	0,12
5	1,69	8,51	4,37	4,14	0,12
6	1,69	8,35	4,77	3,59	0,12
7	1,67	8,69	5,17	3,52	0,12
8	1,79	9,45	5,43	4,02	0,1
9	1,76	10,17	5,98	4,19	0,09
10	1,61	9,21	5,27	3,94	0,09
11	1,56	8,24	4,88	3,36	0,11
\bar{x}	1,67	8,47	4,76	3,7	0,11
max	1,79	10,17	5,98	4,19	0,13
min	1,56	7,48	3,98	3,32	0,09
σ	0,06	0,81	0,60	0,30	0,01

V tabulce 5 jsou zapsány hodnoty sledovaných parametrů pro vzorek č. 2, povrch vytvořený technologií soustružení. Při porovnání s tabulkou 3, kde jsou u vzorku č. 2 výrobcem definované parametry drsnosti $Ra = 1,6 \text{ } \mu\text{m}$, $Rp = 3,2 \text{ } \mu\text{m}$, $Rz = 6,3 \text{ } \mu\text{m}$, lze konstatovat, že rozdíly mezi zjištěnými a udávanými hodnotami, jsou minimální. Vypočítané průměrné hodnoty uvedené v tabulce 5 jsou pro $Ra = 1,67 \text{ } \mu\text{m}$, $Rp = 4,76 \text{ } \mu\text{m}$, $Rz = 8,47 \text{ } \mu\text{m}$.

Zjištěné hodnoty pro parametr Ra (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu) odpovídají výrobcem deklarované drsnosti. I když je zřejmé, že zkoumané povrchy vzorkovnice jsou vlivem častého užívání, pro studijní účely, opotřebované. Je to způsobeno tím, že parametr Ra nedostatečně reaguje na lokální výškové změny povrchu, které se v důsledku opotřebení vyskytují. Další důležitým prvkem je, že u vzorku č. 2, se již nejedná o tak hladký povrch jako byl u vzorku č. 1, kde i sebemenší poškození povrchu znamenalo velký výkyv v naměřených hodnotách sledovaných parametrů drsnosti profilu.

Minimální hodnota parametru Rz u vzorku č. 2 byla $7,48 \text{ } \mu\text{m}$ (profil č. 3), naopak maximum bylo $10,17 \text{ } \mu\text{m}$ (profil č. 9). Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou je více jak $2,5 \text{ } \mu\text{m}$, což by ovšem odpovídalo opotřebení povrchu.

Tabulka 6 Profilové parametry drsnosti broušeného povrchu, vzorek č. 3

	Vzorek č. 3				
profil č.	$Ra \text{ } [\mu\text{m}]$	$Rz \text{ } [\mu\text{m}]$	$Rp \text{ } [\mu\text{m}]$	$Rv \text{ } [\mu\text{m}]$	$RSm \text{ } [\text{mm}]$
1	1,11	7,59	3,67	3,92	0,05
2	1,11	7,12	3,60	3,52	0,05
3	1,05	6,77	3,04	3,72	0,05
4	1,13	7,39	3,55	3,84	0,05
5	1,12	7,37	3,34	4,03	0,05
6	1,11	7,23	3,41	3,82	0,05
7	1,09	7,06	3,47	3,59	0,05
8	1,06	6,59	3,13	3,45	0,05
9	1,09	7,03	3,43	3,59	0,05
10	1,07	7,64	3,80	3,83	0,05
11	1,11	7,82	3,95	3,87	0,05
\bar{x}	1,01	7,24	3,49	3,74	0,05
<i>max</i>	1,13	7,82	3,95	4,03	0,05
<i>min</i>	1,05	6,59	3,04	3,45	0,05
σ	0,02	0,36	0,26	0,17	0,00

V tabulce 6 a 7 jsou uvedeny hodnoty sledovaných parametrů drsnosti pro broušené povrchy. Jedná se o neperiodické povrchy, které mají zcela rozdílnou topografii, jak je patrné na obrázku 23. Další názorná ukázka rozdílů mezi periodickým a neperiodickým povrchem je zachycena na obrázku 25, kde jsou porovnány profily všech zkoumaných vzorků.

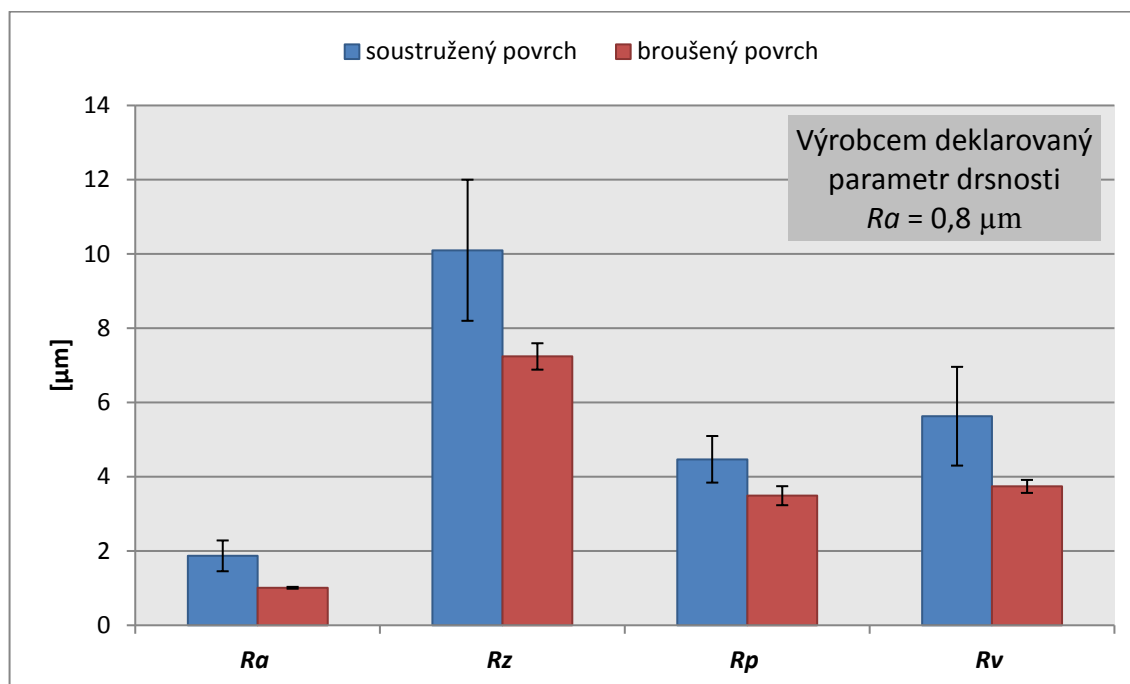
U etalonu broušených povrchů, vzorkovnice SUPRAPHON VP 030 – č. 4, je jediným výrobcem definovaným parametrem průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra . Pro vzorek č. 3 je $Ra = 0,8 \mu\text{m}$ a vzorek č. 4 je $Ra = 1,6 \mu\text{m}$. Vypočítané průměrné hodnoty jsou u vzorku č. 3 $Ra = 1,01 \mu\text{m}$ (tab. 6) a vzorku č. 4 je $Ra = 1,62 \mu\text{m}$ (tab. 7).

Pro lepší odhalení extrémních hodnot byly stanoveny u jednotlivých parametrů jejich maximální a minimální hodnoty. Dále pak byla vypočítána jejich směrodatná odchylka. Při bližším prostudování výškových parametrů Rz , Rp a Rv u vzorků č. 3 (tab. 6) a vzorku č. 4 (tab. 7) lze konstatovat, že nebyly u analyzovaných profilů 1-11 zjištěny extrémní výkyvy hodnot zkoumaných parametrů. Význam parametru Rz je například v případě, kdy není přípustné poškození protější dosedací plochy. Jedná se hlavně o těsnicí plochy, kdy nedostatečné lícování s protilehlou plochou může způsobit dysfunkci tohoto spojení.

Tabulka 7 Profilové parametry drsnosti broušeného povrchu, vzorek č. 3

	Vzorek č. 4				
profil č.	$Ra [\mu\text{m}]$	$Rz [\mu\text{m}]$	$Rp [\mu\text{m}]$	$Rv [\mu\text{m}]$	$RSm [\text{mm}]$
1	1,59	10,87	3,29	7,57	0,21
2	1,58	11,20	3,15	8,06	0,16
3	1,58	11,20	3,47	7,73	0,16
4	1,60	10,63	2,97	7,66	0,16
5	1,56	11,66	3,22	8,44	0,19
6	1,69	11,88	3,25	8,63	0,20
7	1,62	11,97	3,38	8,60	0,19
8	1,63	10,96	3,11	7,86	0,20
9	1,65	10,34	3,17	7,17	0,16
10	1,59	10,38	2,98	7,40	0,17
11	1,70	11,63	3,81	7,83	0,17
\bar{x}	1,62	11,16	3,25	7,90	0,18
<i>max</i>	1,7	11,97	3,81	8,63	0,21
<i>min</i>	1,56	10,34	2,97	7,17	0,16
σ	0,04	0,55	0,23	0,46	0,02

Názorné porovnání zvolených parametrů profilu drsnosti u zkoumaných vzorků soustružených (vzorek č 1 a 2) a broušených (vzorek č. 3 a 4) povrchů je uvedeno na obrázku 26 a 27.



Obrázek 26 Porovnání parametrů drsnosti u vzorku č. 1 a 3

Na obrázku 26 vidíme, že zjištěné hodnoty u sledovaných parametrů jsou vyšší u soustruženého povrchu (vzorek č 1), než u broušeného povrchu (vzorek č. 3). Do grafu byla vynesena směrodatná odchylka, která u soustruženého povrchu vykazuje velký rozptyl. Což jen potvrzuje, že na měřeném povrchu vzorku č. 1 se vyskytují nerovnosti (vrypy po neodborné manipulaci, rýhy po měření kontaktním profilometrem, apod.), které jsou příčinou zhoršené jakosti původně vysoce kvalitního povrchu.

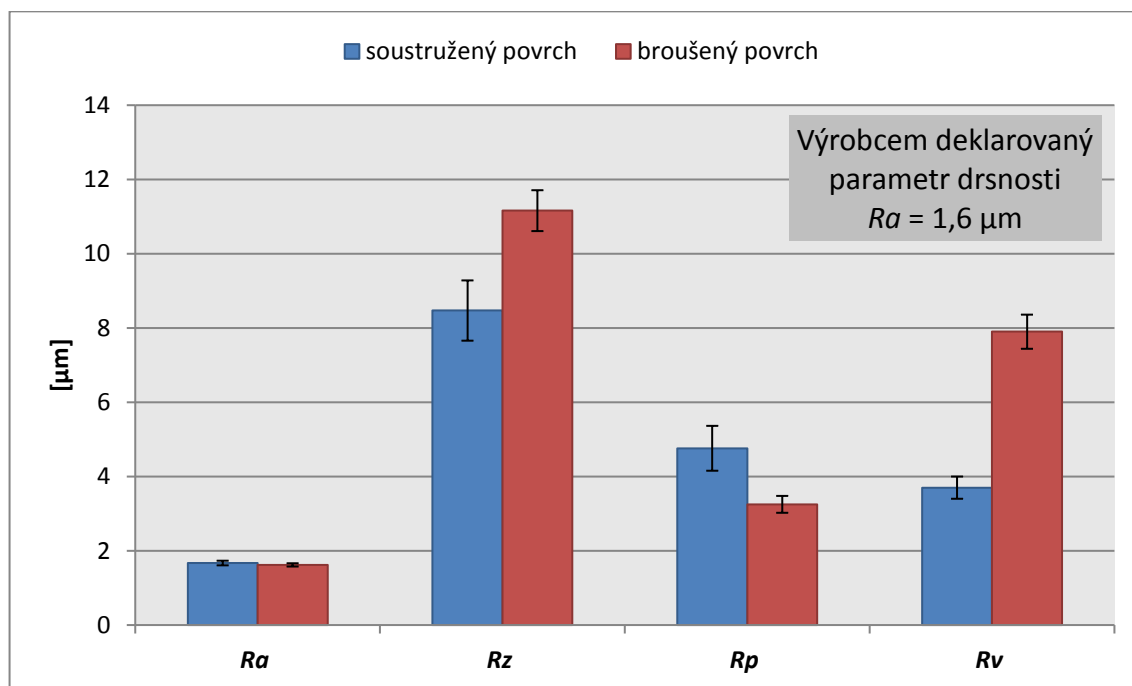
Význam parametru R_p spočívá v jeho možnosti využití pro předpověď nosných charakteristik zkoumaných ploch. Pro stanovení nosné plochy je zapotřebí dalšího výškového parametru, a to parametru R_z . Na základě poměru hodnot parametrů R_p/R_z lze pak předpokládat opotřebení dané plochy. Vypočítané hodnoty poměru R_p/R_z jsou zapsány v tabulce 8. Hodnoty byly stanoveny u zkoumaných vzorků č. 1 až 4 z průměrných hodnot parametrů R_z , a R_p (tab. 4 až 7). Poměr hodnoty R_p vzhledem k R_z je relativně nízký, tudíž lze předpokládat nízké počáteční opotřebení plochy zkoumaných vzorků. Rozdíl mezi danou plochou po vytvoření a po svém prvním použití by byl dle vypočítaných hodnot nejmenší u vzorku č. 4.

Tabulka 8 Stanovení poměru hodnot parametrů R_p/R_z a R_v/R_z

	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4
R_z [μm]	10,1	8,47	7,24	11,16
R_p [μm]	4,47	4,76	3,49	3,25
R_v [μm]	5,63	3,7	3,74	7,90
R_p/R_z [-]	0,44	0,56	0,48	0,29
R_v/R_z [-]	0,56	0,44	0,52	0,71

Stejně jako u největší výšky výstupku profilu R_p , tak i u největší výšky prohlubně profilu R_v lze určit poměr s největší výškou profilu R_z . Podstatný rozdíl ale spočívá v tom, že v tomto případě se nejedná o počáteční opotřebení součásti, ale o množství kapaliny, kterou je schopna daná plocha zadržet.

Vypočítané hodnoty poměru R_v/R_z jsou zapsány v tabulce 8. Hodnoty byly stanoveny u zkoumaných vzorků č. 1 až 4 z průměrných hodnot parametrů R_z a R_v (tab. 4 až 7). Jak je z výsledků patrné, u vzorků č. 1 a 3 (soustružený povrch) jsou vypočítané hodnoty téměř totožné. Jedná se o periodický povrch, kde parametr R_p a R_v dosahuje podobných hodnot (viz obr. 26 a 27). Nejvyšší hodnota poměru parametrů R_v/R_z byla stanovena u vzorku č. 4, což dokládá, že tento povrch ze zkoumaných vzorků dokáže zadržet nejvíce kapaliny.



Obrázek 27 Porovnání parametrů drsnosti u vzorku č. 2 a 4

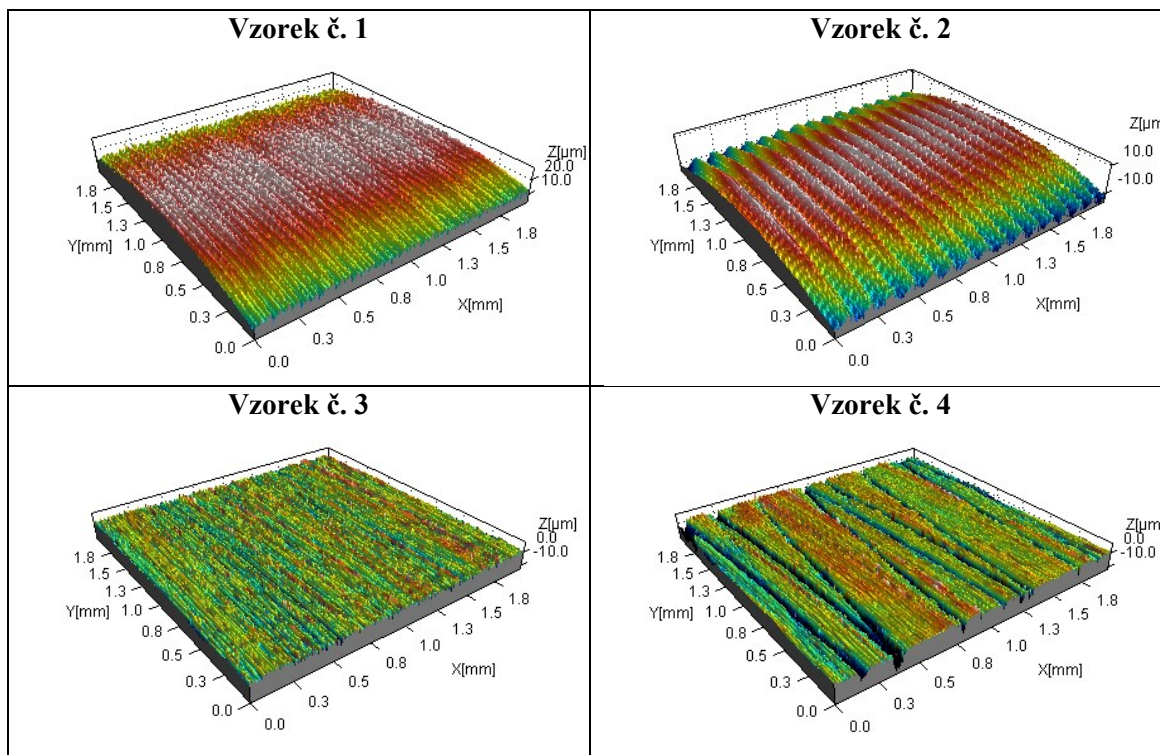
4.4 Analýza zkoumaných povrchů pomocí plošných parametrů

Naměřené vzorky soustružených a broušených povrchů byly analyzovány pomocí programu SPIP. V prvním kroku byl odstraněn tvar těchto soustružených a broušených povrchů vzorků, které byly dále přefiltrovány pomocí S-filtru 5 μm a L-filtru 0,8 mm. Následně byly vypočítány hodnoty plošných parametrů drsnosti S_a , S_z , S_p a S_v (viz tab. 9) definovaných podle normy ČSN EN ISO 25178-2. Pro měření byla použita plocha o velikosti 5x5 mm.

Tabulka 9 Plošné parametry drsnosti

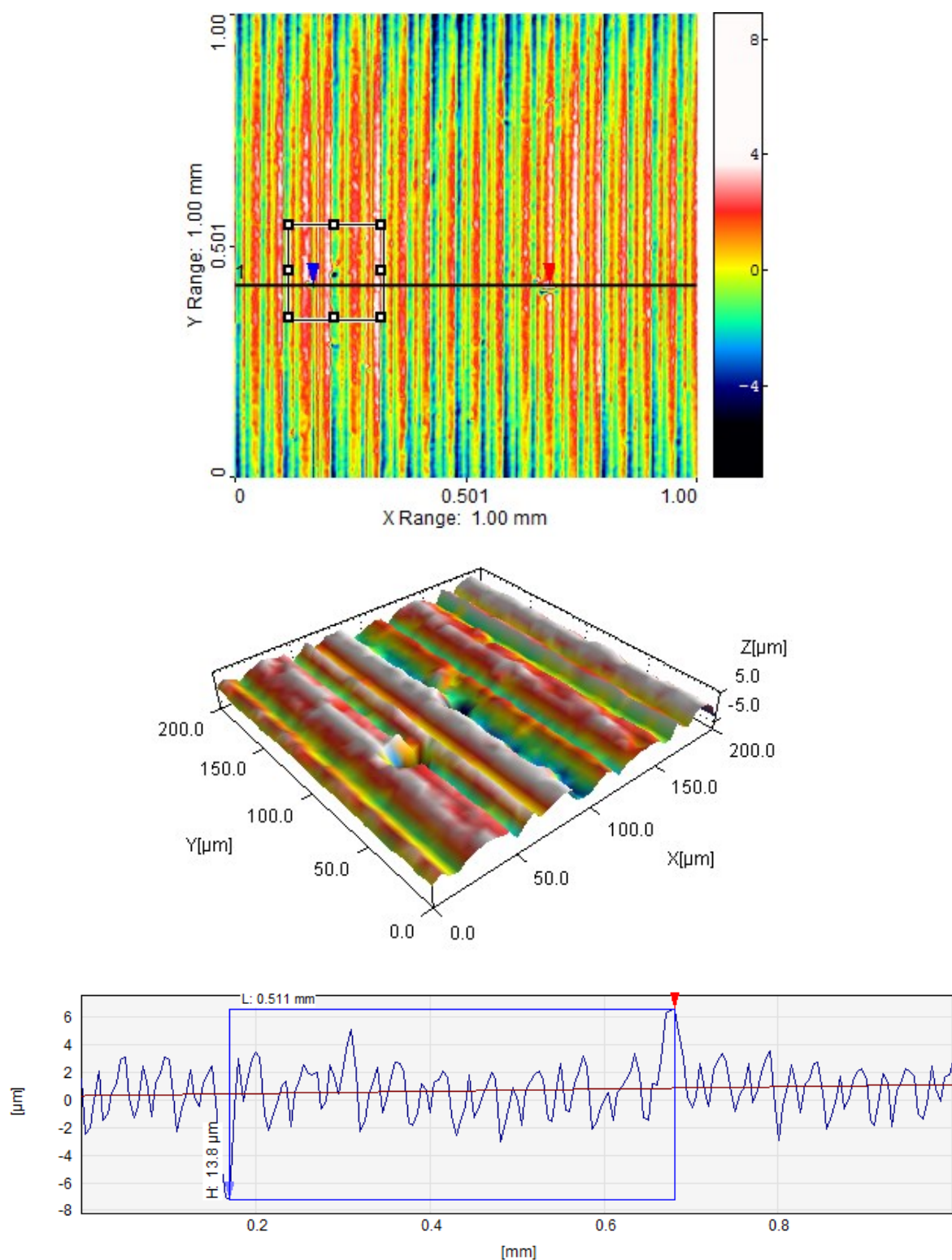
	S_a [μm]	S_z [μm]	S_v [μm]	S_p [μm]
vzorek č. 1	1,88	17,62	9,50	8,12
vzorek č. 2	1,68	29,30	14,03	15,27
vzorek č. 3	1,10	19,94	12,23	7,71
vzorek č. 4	1,61	24,02	13,57	10,45

Na obrázku 28 vidíme povrch zkoumaných vzorků o rozměru 2x2 mm. Již při vizuálním porovnání je zjevné, že se jedná o zcela rozdílné povrchy, a to periodické (vzorek č. 1 a 2) a neperiodické povrchy (vzorek č. 3 a 4).



Obrázek 28 3D obrázky soustružených (vzorek č. 1 a 2) a broušených povrchů (vzorek č. 3 a 4)

Na obrázku 29 vidíme ukázkou detailu nerovností, které se vyskytují na všech zkoumaných vzorcích, a díky kterým jsou stanoveny vyšší hodnoty zkoumaných parametrů drsnosti.



Obrázek 29 Detail nerovností na vzorku č. 1

Plošné výškové parametry mají podobné použití jako profilové výškové parametry. Plošná analýza na rozdíl od profilové dokáže změřit nejvyšší vrchol a nejhlubší dno textury povrchu. Porovnání profilových a plošných parametrů je uvedeno v tabulce 10, kde vidíme, že hodnoty průměrovaných výškových parametrů Ra a Sa jsou stejné. Parametry Sp a Sv jsou parametry, jejichž hodnoty specifikují absolutně nejvyšší a nejnižší body textury zkoumaného povrchu. Maximální výška posuzované plochy Sz je vzdálenost mezi nejvyšším vrcholem a nejhlubším dnem.

U parametru Sa dosahujeme stejných výsledků jako v případě hodnocení profilu pomocí parametru Ra , protože ani tento plošný parametr nerozlišuje vrchy od údolí, ale udává průměrné hodnoty. Nicméně nelze tyto parametry brát za sobě rovné. Přesto je plošné hodnocení, zvláště v případě nepravidelných anizotropních povrchů, jako jsou broušené povrchy, vhodnější než použití profilových parametrů.

Tabulka 10 Porovnání profilových a plošných parametrů drsnosti

	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4
Ra [μm]	1,87	1,67	1,01	1,62
Sa [μm]	1,88	1,68	1,10	1,61
Rz [μm]	10,1	8,47	7,24	11,16
Sz [μm]	17,62	29,30	19,94	24,02
Rp [μm]	4,47	4,76	3,49	3,25
Sp [μm]	8,12	15,27	7,71	10,45
Rv [μm]	5,63	3,7	3,74	7,90
Sv [μm]	9,50	14,03	12,23	13,57

Další sledované plošné parametry Sp , Sv a Sz udávají největší výšku vrcholu, hloubku prolákliny nebo celkovou výšku povrchu a jejich ekvivalenty jsou v profilovém hodnocení parametry Rp , Rv a Rz . Při vzájemném porovnání těchto parametrů (viz tab. 10) vidíme, že hodnoty plošných parametrů jsou dvojnásobné až trojnásobné.

Pro výpočet 3D parametrů používáme plošné filtry, zatímco pro výpočet 2D parametrů aplikujeme profilové filtry. Vybrané profilové a plošné parametry můžeme vzájemně srovnávat. Lze předpokládat, že hodnoty plošných parametrů budou dosahovat vyšších hodnot nežli u profilových parametrů. Je to způsobeno tím, že při profilové analýze povrchu nelze zajistit, že měřená linie zachytila nejhlubší a nejvyšší body studované topografie povrchu.

Názornou ukázkou je obrázek 29, kde na povrchu vzorku č. 1 je vybrána oblast s lokální nerovností povrchu. Na prostorovém znázornění vybrané zkoumané oblasti jsou viditelné dvě porušení povrchu. Na vybraném profilu z povrchu je zachycena jen jedna prohlubeň, kterou vidíme na 3D obrázku vybrané plochy. Zde je rozsah největší výšky výstupku a největší výšky prohlubně stanoven na 13,8 μm . Je to způsobeno tím, že plošná analýza na rozdíl od profilové dokáže změřit nejvyšší vrchol a nejhlubší dno textury povrchu.

Při hodnocení plochy jsou prostorové parametry textury stanovovány z daleko většího množství naměřených dat, které nám poskytují objektivnější prezentaci kontrolované plochy. Je totiž nemožné, aby snímaný profil z povrchu vzorku pokryl největší výstupky a prohlubně na zkoumaném vzorku. Z těchto důvodů lze konstatovat, že vypočítané plošné parametry mají přesnější vypovídací schopnost o funkčních vlastnostech zkoumaného povrchu.

5 Zhodnocení a závěr

Teoretická část byla zaměřena na analýzu současného stavu měření drsnosti povrchu profilu a plochy. V první kapitole diplomové práce byly popsány technologie soustružení a broušení, kterými byly povrchy zkoumaných vzorků obrobny. Další kapitola se věnuje kontaktním a bezkontaktním metodám měření topografie povrchu, přičemž bezkontaktní metoda byla použita v experimentální části práce. Následující kapitoly teoretické části diplomové práce se věnují popisu profilových parametrů povrchu podle normy ČSN EN ISO 4287 [14] a plošných parametrů povrchu, které byly vypsány podle normy ČSN EN ISO 25178-2 [19]. V dnešní době se začínají více využívat plošné parametry drsnosti získané měřením plochy, které nám nahrazují profilové parametry z toho důvodu, že je možné získat objektivnější informace získané z celé plochy povrchu vzorku pro další analýzy.

Praktická část byla zaměřena na více parametrické hodnocení povrchů zkoumaných povrchů vzorkovnice soustružení a broušení, s pomocí bezkontaktní metody měření. Pro experimentální měření byl využit optický profilometr MicroProf FRT. Následná analýza naměřených povrchů byla provedena pomocí programu SPIP. Měření společně s analýzou bylo uskutečněno na Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i v Ostravě. Vzorek tvořila čtvercová plocha o rozměru 5x5 mm. V tabulkách 4 až 7 jsou zapsány naměřené hodnoty profilových parametrů drsnosti R_a , R_z , R_p , R_v a R_{sm} . Na obrázku 25 jsou zobrazeny profily zkoumaných soustružených a broušených povrchů, které byly analyzovány. Porovnání naměřených parametrů drsnosti je znázorněno na obrázku 26 a 27.

Dále byl v tabulce 8 stanoven poměr hodnot parametrů R_p/R_z a R_v/R_z . Kdy na základě poměru hodnot parametrů R_p/R_z lze předpokládat opotřebení dané plochy. Naopak poměr parametrů R_v/R_z udává množství kapaliny, kterou je schopna daná plocha zadržet.

Pro objektivní stanovení kvality povrchu je potřebné využít více normovaných R-parametrů. Jelikož při využití jednoho parametru získáme pouze dílčí pohled na jakost povrchu, což může vést ke špatným závěrům o celkové kvalitě obrobku. Vhodný výběr sledovaných parametrů by měl odpovídat požadavkům na kontrolu provozních aspektů povrchu. Víceparametrové posuzování zajistí komplexnější pohled na chování povrchu.

Pro úplnost více parametrového hodnocení zkoumaných povrchů jsou v tabulce 9 stanoveny plošné parametry S_a , S_z , S_p a S_v . Na obrázku 28 můžeme vidět rozdílnou topografii povrchu zkoumaných ploch vzorků č. 1 až 4. Porovnání zjištěných hodnot profilových a plošných parametrů je uvedeno v tabulce 10. Hodnoty průměrovaných výškových parametrů R_a a S_a jsou stejné. Hodnoty plošných parametrů S_z , S_p a S_v jsou dvojnásobné až trojnásobné.

Plošná analýza povrchu představuje významný kvalitativní pokrok v hodnocení zkoumané textury povrchu. Standardní prostorové hodnocení textury povrchu podle normy ČSN EN ISO 25178-2 [19] nám poskytuje množství nových parametrů, které nám přesněji kvantifikují studovanou plochu a charakterizují funkční vlastnosti povrchu. Prezentované výsledky měření poukazují na nižší spolehlivost parametrů drsnosti vypočítaných z profilu struktury povrchu. Plošné parametry jsou získány z daleko vyššího množství naměřených dat s mnohem větší spolehlivostí, tudíž stanovená hodnota parametru je věrohodnější.

Poděkování

Poděkování patří vedoucí diplomové práce Ing. Lence Čepové, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení. Dále děkuji Ing. Dagmar Klichové za připomínky, čas a pomoc při provádění experimentálních prací.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektů SP2017/147 Specifický výzkum v oblasti výrobních technologií a SP2017/149 Výzkum produktivních a ekologicky úsporných výrobních technologií s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a navazujících magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

6 Literatura

- [1] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., a PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II.* 2. díl. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [2] Výškové parametry textury povrchu. *Nejčtenější strojírenský časopis – MM spektrum* [online]. Praha: www.mmspektrum.com, 2017 [cit 2017-4-12]. Dostupné na <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu.html>
- [3] Tumlikovo: Metal Cutting Technologies [online]. [cit 2017-04-12]. Dostupné na <http://www.tumlikovo.cz/%20geometrie-britu-obecne/>
- [4] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., a PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II.* 1. díl. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [5] Seco Tools CZ s.r.o. [online]. [cit 2017-04-12]. Dostupné na <http://www.secotools.com/cs/CZ-Czech-Republic/Aktuality/TECHNICKE-LANKY/Matematicke-modely-dokai-uinn-vypoitat-ivotnost-nastroje/>
- [6] MASLOV, J. *Teorie broušení kovů.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1979, 246 s
- [7] HUMÁR, A. *Technologie I. Technologie obrábění – 3. část.* Brno: VUT, 2005. [online]. [cit 2017-04-12]. Dostupné na http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni /opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [8] BORSKÝ, V. *Obráběcí stroje.* 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1992, 216 s. ISBN 80-214-0470-1.
- [9] PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M. a VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie: část: metrologie.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. ISBN 80-214-1997-0.
- [10] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie. Část 2, Základy řízení jakosti.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1209-6.

- [11] ČSN EN ISO 3274. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů. Praha: Český normalizační institut, 1999, 20 s.
- [12] Operating Manual FRT MicroProf®, © Fries Research & Technology GmbH, Friedrich Ebert Straße, Germany, version 1.214, manual dated 2009-03-18.
- [13] BUMBÁLEK, L., BUMBÁLEK, B. *Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu*. IN Kvalita a GPS 2005, VUT - FSI Brno 2005.
- [14] ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999, 24 s.
- [15] ČSN ISO 16610-21. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Filtrace - Část 21: Lineární profilové filtry: Gaussovy filtry. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 28 s.
- [16] ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999, 16 s.
- [17] *HOMMEL CS s.r.o.* [online]. Teplice: HOMMEL CS, 2017 [cit. 2017-03-03]. Dostupné na <https://www.hommel-etamic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [18] TICHÁ, Š., a ADAMEC, J. *Návody do cvičení z předmětu Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1916-7
- [19] ČSN EN ISO 25178-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 52 s.
- [20] JIANG, XIANG and WHITEHOUSE, D.J. *Technological shifts in surface metrology*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61 (2). pp. 815-836, 2012. ISSN 0007-8506

- [21] ŠPERKA, P. *Struktura povrchů vybraných strojních součástí*. Brno: VUT, 2009. [online]. [cit 2017-04-12]. Dostupné z WWW: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_technologii_obrabeni.pdf
- [22] ČSN EN ISO 25178-3. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha – Část32: Specifikace operátorů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 20 s.
- [23] JANKOVÝCH, R. a BUMBÁLEK, B. *Výškové parametry textury*. MM Průmyslové spektrum. 2014.
- [24] STOUT, K., J. *Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions*. Penton Press. 2004, 393 s. ISBN 1-8571-8023-2.
- [25] ČEP, R., PETRŮ, J. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011, 143s. ISBN 978-80-248-2533-5.

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 Povrch po soustružení [2].....	11
Obrázek 2 Druhy soustružení a) podelné, b) čelní [1].....	12
Obrázek 3 Vliv řezných podmínek na opotřebení břitu nože [5]	14
Obrázek 4 Schéma broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku [6]	16
Obrázek 5 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [14].....	19
Obrázek 6 Profil povrchu [14]	20
Obrázek 7 Základní délka l_r a vyhodnocovaná délka l_n [17]	21
Obrázek 8 Největší výška profilu [17].....	23
Obrázek 9 Výška prvků profilu [17].....	23
Obrázek 10 Parametr profilu drsnosti R_a [18].....	24
Obrázek 11 Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu drsnosti R_q [17]	24
Obrázek 12 Šikmost posuzovaného profilu drsnosti R_{sk} [17]	25
Obrázek 13 Špičatost posuzovaného profilu drsnosti R_{ku} [17]	25
Obrázek 14 Střední vzdálenost rýh [17]	26
Obrázek 15 Filtrace plochy [21]	27
Obrázek 16 Vztahy mezi S-filtrem, L-filtrem, F-operací a S-F a S-L povrchy [19]	28
Obrázek 17 Neplatný objem a parametry objemu materiálu [19]	32
Obrázek 18 Schematické znázornění principu kontaktního profilometru [10].....	35
Obrázek 19 Optický profilometr MicroProf FRT	36
Obrázek 20 Vzorkovnice: (a) soustružení RUGOTEST 102, (b) broušení SUPRAPHON	37
Obrázek 21 Optický profilometr MicroProf FRT	38
Obrázek 22 Ukázka pracovního prostředí softwaru SPIP	39
Obrázek 23 Zkoumané soustružené (vzorek č. 1 a 2) a broušené povrchy (vzorek č. 3 a 4)	40
Obrázek 24 Ukázka rozmístění 11 vyhodnocovaných profilů na ploše vzorku č. 4	40
Obrázek 25 Profily zkoumaných soustružených (vzorek č. 1 a 2) a broušených povrchů (vzorek č. 3 a 4)	41
Obrázek 26 Porovnání parametrů drsnosti u vzorku č. 1 a 3	46
Obrázek 27 Porovnání parametrů drsnosti u vzorku č. 2 a 4	47
Obrázek 28 3D obrázky soustružených (vzorek č. 1 a 2) a broušených povrchů (vzorek č. 3 a 4).....	48
Obrázek 29 Detail nerovností na vzorku č. 1	49

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 Vztah mezi mezní vlnovou délkou drsnosti (cut-off) λ_c , λ_s a roztečí snímaných bodů profilu [11]	21
Tabulka 2 Technické parametry optického profilometru MicroProf FRT	36
Tabulka 3 Výrobce definované hodnoty parametrů drsnosti vzorkovnice soustružení	38
Tabulka 4 Profilové parametry drsnosti soustruženého povrchu, vzorek č. 1	42
Tabulka 5 Profilové parametry drsnosti soustruženého povrchu, vzorek č. 2	43
Tabulka 6 Profilové parametry drsnosti broušeného povrchu, vzorek č. 3	44
Tabulka 7 Profilové parametry drsnosti broušeného povrchu, vzorek č. 3	45
Tabulka 8 Stanovení poměru hodnot parametrů R_p/R_z a R_v/R_z	47
Tabulka 9 Plošné parametry drsnosti	48
Tabulka 10 Porovnání profilových a plošných parametrů drsnosti	50